



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**DISEÑO Y AUTOMATIZACIÓN DE UN SISTEMA DE AIREACIÓN  
FORZADA PARA EL CO-COMPOSTAJE DE RESIDUOS  
HORTÍCOLAS EN LA COMUNIDAD DE GATAZO CANTÓN COLTA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:

**INGENIERO QUÍMICO**

**AUTOR: VÍCTOR HUGO VALVERDE OROZCO**

**TUTOR: ING. HUGO CALDERÓN**

Riobamba – Ecuador

2015

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

El Tribunal de Trabajo de Titulación certifica que el trabajo de titulación: **“DISEÑO Y AUTOMATIZACIÓN DE UN SISTEMA DE AIREACIÓN FORZADA PARA EL CO-COMPOSTAJE DE RESIDUOS HORTÍCOLAS EN LA COMUNIDAD DE GATAZO CANTÓN COLTA”** de responsabilidad del señor Víctor Hugo Valverde Orozco, ha sido revisado por los Miembros del Tribunal, quedando autorizada su presentación.

Ing. Hugo Calderón ..... ..

**DIRECTOR DEL TRABAJO  
DE TITULACIÓN**

Dra. Irene Gavilanes ..... ..

**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

Yo, Víctor Hugo Valverde Orozco autor y ejecutor del presente proyecto de investigación me responsabilizo de las opiniones, pensamientos y resultados expuestos en la presente investigación, siendo la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO dueña intelectual de la misma.

---

VÍCTOR HUGO VALVERDE OROZCO

## DEDICATORIA

*El presente trabajo de titulación va dedicado a Dios, por todas las bendiciones alcanzadas hasta este punto en mi vida.*

*A mi familia:*

*Mis padres Víctor Hugo y Paty, por su guía, apoyo incondicional, la confianza depositada en mí, todos sus sacrificios y enseñanzas; y mis hermanas Pame y Dannita por su cariño.*

*A Belén por su compañía, apoyo, por enseñarme a ver la vida de otra manera.*

*Con mucho cariño y orgullo a mis abuelitos, en especial a mi Mami Ode por su preocupación.*

*A mis tíos Julio e Irene, por el cariño y todas las enseñanzas brindadas, y la confianza depositada en mí.*

*Víctor Hugo*

## AGRADECIMIENTO

*A Dios y a la vida, por permitirme alcanzar un logro y una alegría más.*

*A mis padres quienes han sido mi apoyo y respaldo frente a cada situación que se me ha presentado.*

*A mis hermanas por su cariño y entusiasmo.*

*A Irene y Julio, por siempre confiar en mí y hacer posible esta investigación.*

*A la escuela de Ingeniería Química de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, por los conocimientos recibidos.*

*A mis amigos del cole, de la universidad, de la vida, por sus enseñanzas, por su cariño, por cada momento compartido y por enseñarme la importancia que tiene la amistad.*

*A mi Director de Tesis Ing. Hugo Calderón y a mi colaboradora Dra. Irene Gavilanes quienes han aportado con sus valiosos conocimientos, su tiempo y guía para la realización de este proyecto de titulación.*

*A todas aquellas personas que de una u otra manera contribuyeron para que este proyecto de titulación culmine con éxito.*

*Víctor Hugo*

## CONTENIDO

RESUMEN.....	xix
INTRODUCCIÓN .....	1
ANTECEDENTES .....	2
JUSTIFICACIÓN .....	3
OBJETIVOS.....	4
 CAPÍTULO I.....	 5
1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL .....	5
1.1. Residuos agroindustriales.....	5
1.1.1. Definición .....	5
1.1.2. Residuos hortícolas .....	5
1.1.3. Características de los residuos hortícolas .....	6
1.2. Problemas de contaminación agrícola.....	6
1.3. Gestión de residuos agroindustriales.....	8
1.3.1. Incorporación de aditivos .....	8
1.3.2. Separación sólido-líquido .....	9
1.3.3. Compostaje .....	9
1.3.4. Digestión anaerobia.....	9
1.3.5. Nitrificación – Desnitrificación .....	9
1.3.6. Combustión.....	10
1.4. Leyes de gestión de residuos agroindustriales .....	10
1.4.1. TULSMA.....	11
1.4.2. La Comisión Europea (European Comission, 2014).....	12
1.4.3. La Agencia de protección ambiental (EPA).....	12
1.5. Compostaje .....	12

1.5.1.	Generalidades y definición .....	12
1.5.2.	Conformación del compost.....	13
1.5.3.	Usos del compost .....	14
1.5.4.	Ventajas y desventajas del compostaje .....	14
1.5.5.	Características del proceso de compostaje.....	15
1.5.6.	Economía del proceso .....	16
1.5.7.	Etapas del proceso de compostaje .....	17
1.5.8.	Factores que intervienen en el proceso de compostaje .....	19
1.5.9.	Planta de producción de compostaje .....	28
1.5.10.	Tipos de operación en las plantas de compostaje .....	30
1.5.11.	Sistemas de compostaje .....	32
1.6.	Investigaciones análogas sobre el compostaje .....	38
1.6.1.	Co-Compostaje de residuos de destilería con estiércol de animales: transformaciones de carbono y nitrógeno en la evaluación de la estabilidad del compost .....	38
1.6.2.	Evaluación de la estabilidad y madurez durante la aireación forzada de compostaje estiércol de pollo y serrín a diferentes relaciones C / N .....	41
1.6.3.	Eliminación de la toxicidad de los polifenoles de lodos de aguas residuales del molino de oliva mediante su co-compostaje con corteza de sésamo .....	45
1.6.4.	Oportunidades y desafíos de la gestión de residuos orgánicos procedentes del sector agroindustrial en América del Sur: Provincia de Chimborazo (Gavilanes, Paredes, & Perez, 2014) .....	49
1.6.5.	Compostaje mejorado de heces de aves de corral a través de la suplementación con arqueos bacterias oxidantes de amoníaco. (Kaizhi & col., 2012).....	52
1.6.6.	El efecto de la tasa de aireación en el compostaje de estiércol de pollo y aserrín con aireación forzada (Mengchun & col, 2010) .....	54
1.6.7.	Comparación entre investigaciones .....	55
1.7.	El sistema Rutgers para pilas estáticas ventiladas .....	58
1.7.1.	Características del sistema .....	58
1.7.2.	Importancia de la velocidad de descomposición .....	59

1.7.3.	Primer factor limitante: interacción entre la generación de calor y temperatura ...	60
1.7.4.	Segundo factor limitante: grado de aerobiosis y porosidad del material.....	61
1.7.5.	Tercer factor limitante: potencial de olor .....	62
1.7.6.	Comparación con un sistema de compostaje similar .....	63
1.7.7.	Componentes básicos del sistema de aireación forzada.....	64
1.7.8.	Tiempo de residencia .....	66
1.7.9.	Control de la disponibilidad de agua.....	67
1.8.	Descripción química del proceso.....	68
1.8.1.	Termodinámica del proceso de compostaje .....	70
1.8.2.	Balances de materia y energía en sistemas de compostaje .....	71
1.9.	Aireación.....	76
1.9.1.	Generalidades .....	76
1.9.2.	Objetivos de la aireación .....	76
1.9.3.	Aireación forzada .....	77
1.9.4.	Aireación intermitente y/o controlada .....	78
1.9.5.	Necesidades de aireación del material.....	79
1.9.6.	Requerimientos de oxígeno por los microorganismos .....	79
1.9.7.	Demanda de aireación para remover la humedad de la mezcla compostada. ....	80
1.9.8.	Demanda de aireación para remover el exceso de calor .....	82
1.9.9.	Suministro uniforme de aire a lo largo de la pila de compostaje.....	82
1.10.	Ventiladores.....	83
1.10.1.	Generalidades y definición .....	83
1.10.2.	Tipos de ventiladores .....	83
1.10.3.	Ventilador centrífugo o venterol.....	84
1.10.4.	Aplicaciones .....	85
1.10.5.	Ecuaciones de ventiladores centrífugos.....	85
1.10.6.	Selección del Ventilador y tiempo de operación.....	86



1.11.	Transporte de fluidos.....	87
1.11.1.	Sistema de tuberías en paralelo .....	87
1.11.2.	Pérdidas de carga en tuberías .....	89
1.11.3.	Ecuación de Darcy .....	90
1.11.4.	Factor de fricción de Darcy .....	90
1.12.	Control automático de procesos.....	91
1.12.1.	Sistema de control del proceso .....	91
1.12.2.	Automatismo.....	91
1.12.3.	Autorregulación del proceso .....	92
1.12.4.	Términos importantes para el control de procesos .....	92
1.12.5.	Razones principales para el control de proceso.....	93
1.12.6.	Componentes básicos de un sistema de control .....	93
1.12.7.	Funciones de transferencia.....	95
1.12.8.	Diagramas de bloques .....	95
1.12.9.	Controladores lógicos programables (PLC) .....	95
1.12.10.	Selección de la estructura de control del sistema .....	96
1.12.11.	Control por retroalimentación.....	96
1.12.12.	Selección de variables de entrada y de salida del controlador .....	98
CAPÍTULO II .....		99
2.	PARTE EXPERIMENTAL.....	99
2.1.	Localización de la investigación.....	99
2.1.1.	Localización geográfica .....	99
2.1.2.	Macro localización .....	99
2.1.3.	Micro localización .....	100
2.1.4.	Características climatológicas del lugar: .....	101
2.1.5.	Problemática ambiental actual .....	101
2.1.6.	Impactos esperados con la implementación del proyecto.....	101

<b>2.2.</b>	<b>Métodos y técnicas .....</b>	<b>102</b>
<b>2.2.1.</b>	<b>Métodos.....</b>	<b>102</b>
<b>2.2.2.</b>	<b>Técnicas.....</b>	<b>103</b>
<b>2.2.3.</b>	<b>Variables de proceso .....</b>	<b>103</b>
<b>2.3.</b>	<b>Propuesta de diseño .....</b>	<b>104</b>
<b>2.3.1.</b>	<b>Características de los materiales a compostar.....</b>	<b>104</b>
<b>2.3.2.</b>	<b>Estructura y tamaño de los residuos .....</b>	<b>105</b>
<b>2.3.3.</b>	<b>Humedad.....</b>	<b>105</b>
<b>2.3.4.</b>	<b>Lugar e instalaciones .....</b>	<b>105</b>
<b>2.3.5.</b>	<b>Configuración de la pila de compostaje .....</b>	<b>106</b>
<b>2.3.6.</b>	<b>Configuración del sistema de tuberías .....</b>	<b>106</b>
<b>2.3.7.</b>	<b>Pre-tratamiento y post-tratamiento de los residuos.....</b>	<b>107</b>
<b>CAPÍTULO III.....</b>		<b>108</b>
<b>3.</b>	<b>DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN.....</b>	<b>108</b>
<b>3.1.</b>	<b>Consideraciones para el diseño .....</b>	<b>108</b>
<b>3.2.</b>	<b>Definición de las funciones del sistema.....</b>	<b>109</b>
<b>3.2.1.</b>	<b>Descripción del sistema seleccionado .....</b>	<b>109</b>
<b>3.3.</b>	<b>Cálculos.....</b>	<b>110</b>
<b>3.3.1.</b>	<b>Datos.....</b>	<b>110</b>
<b>3.3.2.</b>	<b>Calculo de la cantidad diaria de substrato tratado.....</b>	<b>110</b>
<b>3.3.3.</b>	<b>Cálculo de la cantidad de agua a remover de la mezcla de materiales.....</b>	<b>111</b>
<b>3.3.4.</b>	<b>Calculo de la cantidad de aire necesaria para remover la humedad.....</b>	<b>111</b>
<b>3.3.5.</b>	<b>Calculo del flujo de aire requerido para remover la humedad.....</b>	<b>113</b>
<b>3.3.6.</b>	<b>Selección del ventilador .....</b>	<b>114</b>
<b>3.3.7.</b>	<b>Determinación de las características del ventilador.....</b>	<b>115</b>
<b>3.3.8.</b>	<b>Determinación del tiempo de operación del ventilador (Top).....</b>	<b>116</b>
<b>3.3.9.</b>	<b>Cálculos del sistema de tuberías .....</b>	<b>117</b>

3.3.10.	Calculo del caudal y área de sección transversal de las tuberías 1 y 2:.....	117
3.3.11.	Calculo del caudal en cada rama. ....	121
3.3.12.	Determinación de la velocidad de salida en cada rama .....	121
3.3.13.	Cálculo del diámetro y espaciamiento de los orificios en las secciones longitudinales de las tuberías. ....	122
3.4.	Dimensionamiento.....	122
3.5.	Automatismo.....	124
3.5.1.	Diseño del sistema de control automático .....	124
3.5.2.	Diagrama de bloques del sistema de control.....	124
3.5.3.	Reducción del diagrama de bloques. ....	126
3.5.4.	Calculo de la respuesta para la perturbación.....	127
3.5.5.	Diagrama lógico del micro controlador .....	128
3.6.	Tipos de materiales .....	129
3.6.1.	Materiales para el sistema de aireación .....	129
3.6.2.	Materiales para automatización .....	129
3.7.	Requerimiento presupuestario.....	130
3.7.1.	Recursos humanos.....	130
3.7.2.	Recursos materiales .....	130
3.7.3.	Recursos totales .....	130
3.8.	Resultados .....	131
3.8.1.	Resultados del dimensionamiento.....	131
3.8.2.	Validación del equipo.....	131
3.9.	Análisis y discusión de resultados .....	133
CONCLUSIONES.....		135
RECOMENDACIONES.....		136
BIBLIOGRAFÍA: .....		137

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

<b>AOA</b>	Arqueo bacterias oxidantes de amoníaco
<b>As</b>	Arsénico
<b>C</b>	Carbono
<b>C/N</b>	Relación Carbono / Nitrógeno
<b>Ca</b>	Calcio
<b>Cd</b>	Cadmio
<b>CE</b>	Conductividad eléctrica
<b>Chidro</b>	Carbono hidrosoluble
<b>CIC</b>	Capacidad de intercambio catiónico
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono
<b>Corg</b>	Carbono orgánico
<b>COT</b>	Carbono orgánico total
<b>COVs</b>	Compuestos orgánicos volátiles
<b>Cr</b>	Cromo
<b>Cs</b>	Razón de sustrato tratado por día
<b>Cu</b>	Cobre
<b>dS/m</b>	DeciSiemens por metro
<b>EPA</b>	Environmental Protection Agency
<b><i>f</i></b>	Factor de fricción de Darcy
<b>Fe</b>	Hierro
<b>FMS</b>	Fermentación en medio sólido
<b>g</b>	Aceleración de la gravedad, m/s <sup>2</sup>
<b>H</b>	Entalpía
<b>h<sub>acc</sub></b>	Pérdidas por accesorios
<b>h<sub>f</sub></b>	Pérdidas por fricción
<b>Hg</b>	Mercurio
<b>h<sub>L</sub></b>	Pérdidas de carga
<b>Hp</b>	Horse Power, unidad de potencia
<b>hPa</b>	Hectopascales
<b>HR</b>	Humedad relativa

<b>IG</b>	Índice de germinación
<b>K</b>	Potasio
<b>K</b>	Grados Kelvin
<b>Kg</b>	Kilogramos
<b>Kg/m<sup>3</sup></b>	Kilogramos por metro cúbico
<b>m</b>	Metros
<b>m/s</b>	Metros sobre segundo
<b>m<sup>2</sup>/s</b>	Metros cuadrados por segundo
<b>m<sup>3</sup></b>	Metros cúbicos
<b>m<sup>3</sup>/h</b>	Metros cúbicos por hora
<b>m<sub>aire</sub></b>	Cantidad de aire necesaria para remover el agua
<b>m<sub>arem</sub></b>	Masa de agua a remover de la mezcla
<b>Mg</b>	Magnesio
<b>mm/año</b>	Milímetros por año, indicador de precipitaciones
<b>mmHg</b>	Milímetros de mercurio
<b>Mn</b>	Manganeso
<b>MO</b>	Materia orgánica
<b>msnm</b>	Metros sobre el nivel del mar
<b>N</b>	Nitrógeno
<b>Na</b>	Sodio
<b>NH<sub>4</sub></b>	Amonio
<b>Ni</b>	Níquel
<b>NO<sub>3</sub></b>	Nitrato
<b>Nt</b>	Nitrógeno total
<b>P</b>	Fosforo
<b>Pb</b>	Plomo
<b>pH</b>	Potencial de hidrógeno
<b>PLC</b>	Controlador lógico programable
<b>PV</b>	Presión de vapor
<b>PVC</b>	Poli vinilo de cloruro
<b>PVS</b>	Presión de vapor saturado
<b>Q</b>	Caudal de aire
<b>Qp</b>	Calor liberado en el sistema
<b>RS</b>	Residuos Sólidos

<b>Se</b>	Selenio
<b>Top</b>	Tiempo de operación del ventilador centrífugo
<b><math>\mu\text{S/cm}</math></b>	Micro Siemens por centímetro
<b>v</b>	Velocidad
<b>W</b>	Humedad específica
<b>X</b>	Humedad del sustrato (base seca)
<b>Zn</b>	Zinc

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Temperatura y tiempo necesarios para la destrucción de patógenos .....	27
Tabla 2-1 Niveles aceptables y óptimos de los factores físicos y químicos para el compostaje.....	27
Tabla 3-1 Concentraciones de nutrientes y metales pesados en el compost maduro .....	40
Tabla 4-1 Características de los residuos agroindustriales de origen vegetal .....	49
Tabla 5-1 Macro y Micronutrientes presentes en residuos agroindustriales de origen vegetal.....	49
Tabla 6-1 Elementos potencialmente tóxicos de los residuos agroindustriales de origen vegetal .....	49
Tabla 7-1 Análisis comparativo entre las diversas investigaciones .....	56
Tabla 8-1 Diferencias fundamentales entre el sistema Rutgers y Beltsville .....	64
Tabla 9-1 Valores del coeficiente k en pérdidas singulares .....	89
Tabla 10-1 Valores típicos de coeficientes de rugosidad .....	90
Tabla 11-2 Variables de proceso de la etapa determinante del compostaje.....	103
Tabla 12-2 Propuesta de diseño de la investigación .....	104
Tabla 13-2 Características físico químicas de residuos de la comunidad de Gatazo .....	104
Tabla 14-2 Composiciones propuestas para la mezcla de materiales .....	105
Tabla 15-3 Características y funciones específicas del sistema propuesto .....	109
Tabla 16-3 Datos considerados para cálculos (Ver apartado 1.9.7).....	110
Tabla 17-3 Características del ventilador seleccionado .....	115
Tabla 18-3 Datos obtenidos experimentalmente del ventilador.....	115
Tabla 19-3 Características de la tubería de PVC.....	117
Tabla 20-3 Datos adicionales para cálculos del sistema de tuberías .....	118
Tabla 21-3 Distribución de los orificios a lo largo de la tubería.....	122
Tabla 22-3 Dimensionamiento del sistema de aireación forzada.....	123
Tabla 23-3 Materiales usados en el sistema de distribución de aire .....	129
Tabla 24-3 Materiales usados para automatización .....	129
Tabla 25-3 Recursos humanos .....	130
Tabla 26-3 Recursos materiales .....	130
Tabla 27-3 Recursos totales .....	130
Tabla 28-3 Resultados del dimensionamiento del sistema de aireación .....	131

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Adición de sustancias químicas a los cultivos .....	7
Figura 2-1 Esquema general del proceso de compostaje .....	14
Figura 3-1 Gráfica temperatura vs tiempo de compostaje .....	19
Figura 4-1 Factores químicos en el proceso de compostaje.....	20
Figura 5-1 Factores físicos en el proceso de compostaje.....	22
Figura 6-1 Planta de compostaje industrial .....	29
Figura 7-1 Diagrama de flujo operativo general de una planta de compostaje.....	30
Figura 8-1 Diagrama de proceso de una planta de compostaje de operación manual.....	31
Figura 9-1 Diagrama de proceso de una planta de compostaje parcialmente mecanizada .....	31
Figura 10-1 Diagrama de proceso de una planta de compostaje mecanizada .....	32
Figura 11-1 Clasificación general de los sistemas de compostaje .....	33
Figura 12-1 Pilas de compostaje estáticas.....	34
Figura 13-1 Pilas de compostaje ventiladas .....	35
Figura 14-1 Compostaje aislado en silos de hormigón .....	36
Figura 15-1 Compostaje en túnel .....	37
Figura 16-1 Compostaje en nave.....	37
Figura 17-1 Gráfica de variación de temperatura vs tiempo de compostaje .....	40
Figura 18-1 Gráficas Temperatura vs Tiempo para las tres mezclas de compostaje .....	43
Figura 19-1 Variaciones de pH a lo largo del proceso de compostaje.....	43
Figura 20-1 Variación de temperatura vs tiempo para las diferentes pilas de compostaje .....	46
Figura 21-1 Contenido de materia orgánica inicial y final para cada pila de compostaje.....	47
Figura 22-1 Evolución del pH para cada pila de compostaje.....	47
Figura 23-1 Evolución de la temperatura, pH, y relación C/N del proceso .....	53
Figura 24-1 Evolución del perfil de temperatura .....	54
Figura 25-1 Esquema del sistema Rutgers para pilas estáticas ventiladas .....	59
Figura 26-1 Fenómenos que tienen lugar en el proceso de compostaje.....	69
Figura 27-1 Esquema de la ley de conservación de la energía en un sistema de compostaje .....	70
Figura 28-1 Esquema de la reacción general en un proceso de compostaje .....	72
Figura 29-1 Balance general de materia de una pila de compostaje .....	72
Figura 30-1 Balance de materia de las fracciones más representativas del proceso de compostaje ..	73
Figura 31-1 Esquema de un sistema de aireación forzada usado en residuos orgánicos .....	78



Figura 32-1 Clasificación de ventiladores según el modo de trabajo.....	84
Figura 33-1 Esquema general de un ventilador centrífugo .....	85
Figura 34-1 Diagrama de un sistema de tuberías en paralelo .....	88
Figura 35-1 Elementos básicos de un sistema de control.....	94
Figura 36-1 Diagrama de bloques de sistema de control retroalimentado .....	97
Figura 37-2 Localización del Cantón Colta dentro de la Provincia de Chimborazo.....	99
Figura 38-2 Ubicación de la Parroquia Cajabamba (Villa La Unión).....	100
Figura 39-2 Ubicación de la comunidad Gatazo.....	100
Figura 40-2 Dimensiones de la pila de compostaje.....	106
Figura 41-2 Planta de compostaje con aireación forzada.....	107
Figura 42-3 Consideraciones de diseño del sistema propuesto.....	108
Figura 43-3 Sistema de tuberías de distribución de aire .....	117
Figura 44-3 Esquema lógico del sistema de control diseñado. ....	124
Figura 45-3 Diagrama de bloques del sistema de control del proceso de compostaje .....	126
Figura 46-3 Diagrama de bloques reducido del sistema de control del proceso de compostaje .....	126
Figura 47-3 Diagrama de flujo lógico del controlador diseñado.....	128

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A.** TULSMA LIBRO VI ANEXO VI TABLA 2

**ANEXO B.** NORMA EUROPEAN COMISSION

**ANEXO C.** NORMA EPA 2001

**ANEXO D.** TABLA DE PROPIEDADES DEL AIRE A 1 ATM DE PRESIÓN

**ANEXO E.** DIAGRAMA VISTA ISOMETRICA DEL SISTEMA DE AIREACION

**ANEXO F.** DIAGRAMA VISTA SUPERIOR DEL SISTEMA DE AIREACION

**ANEXO G.** DIAGRAMA DIMENSIONES DEL SISTEMA DE TUBERIAS

**ANEXO H.** SIMULACION DE LA TRAYECTORIA DEL FLUIDO EN EL SISTEMA DE TUBERIAS

**ANEXO I.** DIAGRAMA DEL CIRCUITO ELECTRICO DEL SISTEMA DE CONTROL

**ANEXO J.** VISTA FRONTAL DEL SISTEMA DE CONTROL AUTOMATICO

**ANEXO K.** SISTEMA DE AIREACIÓN

**ANEXO L.** MANUAL DE OPERACIÓN DEL EQUIPO

**ANEXO M.** MANUAL PARA LA PREPARACION DE LAS PILAS DE COMPOSTAJE

## RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo el diseño y automatización de un sistema de aireación forzada para el co-compostaje de residuos hortícolas de la parroquia Gatazo de la provincia de Chimborazo, determinar tipos de materiales empleados y presupuesto necesario para su construcción. Con el fin de estudiar los fenómenos que rigen el proceso de compostaje, la investigación se basó en contribuciones bibliográficas y comparaciones obtenidas de investigaciones acerca del compostaje y sus diferentes configuraciones. Se identificó las variables críticas de proceso como la temperatura, humedad y concentración de oxígeno. Esta determinación permitió realizar cálculos para el dimensionamiento y construcción del equipo. Los cálculos de ingeniería establecen la cantidad de aire requerida para remover el exceso de humedad de la mezcla de materiales, así como la distribución adecuada del aire a través de la pila de compost. Los resultados muestran que el equipo consta de materiales como un ventilador centrífugo para la inyección de aire de 0.75 Hp de potencia, un sistema de tuberías de distribución del aire de PVC perforadas a lo largo de su sección longitudinal, para tratar aproximadamente 2000 kg de residuos. El equipo construido brinda un control de las variables de proceso mediante una estructura automatizada de control que permite programar periodos de operación, y además realiza un ajuste de la temperatura cuando esta excede un valor máximo mediante ventilación. El presupuesto para la construcción del equipo fue de 1200 dólares aproximadamente. El sistema de aireación forzada cumplió con los objetivos deseados, por tanto se concluye que el equipo diseñado es adecuado para el desarrollo del proceso de compostaje, logrando control de las variables, disminución de costos de operación y tiempo de residencia. Se recomienda definir las cantidades de residuos así como realizar un pre-tratamiento a los residuos hortícolas a tratar.

**Palabras Claves:** <RESIDUOS HORTÍCOLAS> <COMPOSTAJE> <GATAZO [COMUNIDAD]>  
<AGROQUÍMICA> <VENTILADOR CENTRÍFUGO> <CONTROL AUTOMÁTICO>  
<SISTEMA DE AIREACIÓN> <GESTIÓN DE RESIDUOS>

## SUMMARY

This research had as objective the design and automation of a system of forced ventilation for the co-composting of vegetable wastes of Gatazo Community of the Chimborazo province, to determine types of materials used and budget required for its construction. In order to study phenomena that rule the composting process, the research was based on bibliographical contributions and comparisons obtained from research on composting and its different shapes. The critical variables of the process as the temperature, humidity and oxygen concentration were identified. This determination allowed to perform calculations for the sizing and equipment construction. Engineering calculations provide the amount of air required to remove excess humidity from the mix of materials, as well as the proper distribution of air through the compost pile. The results show that the equipment consists of materials as centrifugal fan for the injection of air of 0.75 Hp of power, a distribution of the PVC air pipe system perforated along its longitudinal section, to treat approximately 2000 kg of wastes. The built equipment provides control variables of process through an automated structure control that allows programming operation periods, and also performs a temperature setting when it exceeds a maximum value through ventilation. The budget for the equipment construction was approximately 1200 dollars. Forced ventilation system complied with the desired objectives. This research work concludes that the designed equipment is suitable for the development of the composting process, obtaining control of the variables, reduction of residence time and operating costs and it is recommended to define the wastes quantities as well as perform a pre-treatment to the vegetable wastes to be treated.

**Key Words:** <VEGETABLE WASTES> <COMPOSTING> <GATAZO COMMUNITY> <AGROCHEMICAL> <CENTRIFUGAL FAN> <AUTOMATIC CONTROL> <VENTILATION SYSTEM> <WASTE MANAGEMENT>

## **INTRODUCCIÓN**

La incorrecta disposición de desechos agrícolas causa problemas de contaminación, eutrofización y esterilización de suelos, debido a la presencia de bacterias patógenas, inadecuada relación de nutrientes, y principalmente porque el cultivo de hortícolas genera una alta cantidad de residuos agrícolas, no aprovechables para el consumo, que se dejan en el suelo sin ningún tipo de tratamiento.

Actualmente el compostaje se usa como una opción para disminuir las sustancias contaminantes en el suelo, reducción de residuos de procesos agrícolas, y como un abono natural, constituyendo así una herramienta que busca reducir la contaminación desde su inicio, confiriéndole una clasificación de proceso limpio, que cumple con las características que demanda la química verde requerida en la actualidad por el medio ambiente.

La presente investigación busca, con base en revisiones bibliográficas, investigar, analizar y proponer una alternativa que cumpla con el control de algunas de las etapas y variables involucradas en el proceso, y conferirle un carácter de actividad ecológica, simple y sustentable; que requiere de mínima tecnología y complejidad para tecnificar el proceso de compostaje. La alternativa propuesta, por sus características será un sistema conveniente, con operaciones simples, adaptado a las necesidades de la comunidad, de fácil manejo y mantenimiento, y aplicable a actividades agrícolas de la zona, garantizando así que los productos del proceso cumplan con requisitos establecidos en normas ambientales.

## ANTECEDENTES

La provincia de Chimborazo está situada en la zona central del pasillo interandino de la Sierra del país, es apta para el cultivo de cereales, tubérculos, legumbres, hortalizas y flores; debido a su cercanía con las cumbres más elevadas del país, sus climas y suelos.

En los años 90 empieza a comercializar sus productos directamente a otras provincias, pero fracasa debido al esfuerzo aislado de pocos agricultores que no se encontraban bien organizados. La superficie cultivada de la provincia es de aproximadamente 81787 hectáreas (INFOAGRO, 2013). Esto hace que se la clasifique como la principal provincia de menor producción agrícola en el Ecuador, con tubérculos como la papa y hortalizas como el brócoli como principales productos.

Debido al incremento en la demanda mundial, se han incrementado las exportaciones de productos agrícolas de Ecuador fenómeno que ha causado que en 2012 el país registre un crecimiento del 41.88%, a partir del año 2000, en materia de exportaciones de productos hortícolas, registrando una tasa de crecimiento promedio anual de 12.20%, siendo sus principales mercados internacionales Estados Unidos, Japón y Alemania. (SINAGAP, 2013), El cultivo de hortalizas en la zona, expandió su mercado con exportaciones hacia Europa principalmente del brócoli (*Brassica oleracea*) a partir del año 2010, gracias a una certificación de calidad obtenida (MIPRO, 2011). A raíz de este fenómeno la provincia de Chimborazo se convierte en la zona agrícola con mayor producción de brócoli en el país, con un 68% de la producción nacional. Dentro de la provincia, la comunidad de Gatazo, perteneciente al Cantón Colta, localizada 10 kilómetros al sur de Riobamba en la parroquia Cajabamba, es la que posee mayor cantidad de hectáreas dedicadas a la producción de brócoli, del total de sus cultivos (SINAGAP, 2014)

Debido a la naturaleza de las hortalizas y la forma de cultivo de la misma, el suelo presenta problemas de disposición inadecuada de residuos agrícolas, uso de fertilizantes y nutrientes químicos que disminuyen su fertilidad, y empobrecen la calidad de los productos ahí cultivados, razón por la cual desde el año 2014 y hasta la actualidad, las exportaciones de los productos de esta zona han cesado.

## JUSTIFICACIÓN

El cambio de matriz productiva y energética que impulsa el gobierno de turno en nuestro país, se enfoca en actividades de remediación y conservación ambiental, favoreciendo la implementación de proyectos multipropósito, que permitirán evitar inconvenientes y buscar soluciones para los problemas existentes en la producción agrícola del país.

Este enfoque, y el hecho de que entre el 2013 y 2014 Ecuador se posicionó como el séptimo país exportador a nivel mundial de brócoli, con una exportación de 56 mil toneladas, aportando con un 5.03% de las exportaciones mundiales (SINAGAP, 2013), exige a productores, organismos gubernamentales y universidades el planteamiento de un nuevo enfoque, basado en elaborar proyectos que mitiguen y solucionen los problemas existentes, incrementando así la competitividad en el mercado internacional al país en el sector de exportaciones de productos agrícolas.

Esta investigación plantea el diseño, automatización y construcción de un sistema de aireación forzada para el co-compostaje de residuos hortícolas generados en las actividades agrícolas de la comunidad. Varios autores como (Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity, 2008) (Evaluation of two different aeration systems for composting two-phase olive mill wastes, 2006) (The science of composting, 1997) (Solid-state fermentation, 2003) (Relationships between water-soluble carbohydrate and phenol fractions and the humification indices of organic wastes during composting., 1999) (A negative-pressure aeration system for composting food wastes., 2008) (Determination of aeration rate and kinetics of composting some agricultural wastes, 2004), entre otros han realizado experimentos e investigaciones previas con distintos materiales, métodos y combinaciones en materia de compostaje.

La prestigiosa institución “Escuela Superior Politécnica de Chimborazo” en su Facultad de Ciencias, Escuela de Ingeniería Química cuenta con estudiantes capaces de iniciar un proceso investigativo en las tecnologías existentes acerca del tema, y diseñar sistemas de control para los mismos, proporcionando tecnología de un balance económico favorable para los beneficiarios del mismo.

Por cada una de las razones anteriores, la investigación propuesta tiene como objetivo a largo plazo el mejoramiento de la calidad ambiental y de los productos cultivados en la comunidad.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

- Diseñar y automatizar un sistema de aireación forzada para el co-compostaje de residuos hortícolas en la comunidad de Gatazo, Cantón Colta

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar las variables de proceso presentes en el proceso de compostaje.
- Realizar el diseño de ingeniería para el sistema de aireación forzada incluido su dimensionamiento y tipo de materiales empleados.
- Diseñar un sistema de control automatizado para el sistema de aireación forzada.
- Validar el diseño y funcionamiento del equipo.
- Determinar el presupuesto necesario para la construcción del equipo



## **CAPÍTULO I**

### **1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL**

#### **1.1. Residuos agroindustriales**

##### ***1.1.1. Definición***

Son residuos originados en áreas destinadas a la actividad agrícola, una parte de los mismos que no constituyen la cosecha, o que no satisface índices mínimos de calidad para la comercialización (Kiely, 1999). Se obtienen de parcelas previamente cultivadas o de limpiezas realizadas en el campo para evitar plagas y renovar el suelo para el siguiente cultivo. Están formados por un grupo heterogéneo de productos que componen las plantas, como pueden ser cereales, frutas u hortalizas, etc.

Pueden considerarse también como residuos agrícolas los subproductos de origen vegetal generados por la industria de transformación agrícola y ciertos insumos usados en la misma (sustratos ya utilizados, maderas, plásticos, tuberías de riego, etc.).

##### ***1.1.2. Residuos hortícolas***

Son residuos agroindustriales, específicamente los generados en el cultivo de hortalizas destinadas al consumo. El cultivo de estas plantas se desarrolla regularmente en huertos. Generalmente incluyen residuos de verduras y legumbres tales como tallos de espinacas, coles, calabazas, brócoli, remolacha y zanahoria, etc.

### ***1.1.3. Características de los residuos hortícolas***

Presentan un elevado contenido de materia orgánica, contenido hídrico y fracción mineral variables, y relación C/N generalmente alta, aunque con notables diferencias según la naturaleza y composición del residuo (INFOAGRO, 2013).

La biodegradabilidad de estos materiales depende directamente del contenido de biomoléculas de fácil degradación (celulosas, hemicelulosas, etc.) y de componentes de degradación lenta (ceras, ligninas y otros poli fenoles).

Son generados por necesidades forestales, más no energéticas, por tanto no poseen la calidad suficiente para otras aplicaciones que no sean las energéticas o de aporte de nutrientes según la agricultura tradicional (Keener, y otros, 1993).

## **1.2. Problemas de contaminación agrícola**

Los residuos sólidos orgánicos juegan un rol fundamental en la contaminación ambiental. Diversos tratamientos realizados a estos residuos como el almacenamiento en vertederos, incineración, pirólisis, aprovechamiento para la producción de biogás o compost, son prácticas necesarias y requeridas en cualquier ecosistema para disminuir el impacto negativo que causan en el medio ambiente.

La adición de materia orgánica al suelo de modo tradicional, como estiércoles u otros residuos orgánicos de las propias explotaciones agrícolas y ganaderas, a fin de mejorar su fertilidad y restituir elementos nutritivos extraídos por los cultivos, se ha visto disminuida hasta el punto de perder importancia en la actualidad. Al buscarse mayores rendimientos de producción, se ha relegado al suelo a un mero soporte del cultivo. Por esta razón, se han ido sustituyendo por fertilizantes minerales, alterando el equilibrio del suelo, confluyendo en una paulatina disminución de su calidad biológica, siendo la agricultura intensiva, la práctica en la que más se evidencian los problemas mencionados.

Los residuos pueden mostrar un inconveniente estado fitosanitario como consecuencia de la adición de aguas residuales a los cultivos, y la existencia de plagas y enfermedades en el cultivo de procedencia (insectos, nematodos, hongos, virus, bacterias, etc.). Estos residuos pueden llegar a ser altamente problemáticos, especialmente en los cultivos con tratamientos intensivos, donde se han aplicado materias activas de lenta degradación y alta permanencia en el suelo.



**Figura 1-1** Adición de sustancias químicas a los cultivos

**Fuente:** (FAO, 2012)

El desconocimiento de estos fenómenos, la ausencia de tratamiento, y las malas prácticas medioambientales, han provocado el vertido incontrolado de los residuos, lo que ha originado contaminación progresiva de los suelos, provocando degradación de su estructura y disminución de materia orgánica, amplificando su nivel de compactación y fenómenos erosivos.

En Chimborazo existen antecedentes que indican un alto uso de aguas residuales en actividades agrícolas, lo cual podría ser un indicador de contaminación alta. Otro aspecto crítico es la adición de agroquímicos prohibidos, y que según los productores se usan de manera extendida. (INIAP, 2010).

La solución es encontrar soluciones para mitigar esta práctica, prescindiendo del uso indiscriminado de contaminantes, ocasionando un cambio en el ambiente y en la calidad de vida. (Gordillo, et al., 2010).

La obtención de biogás y el compostaje son técnicas idóneas para minimizar dicha contaminación y a la vez generar productos económicamente valiosos (Determination of aeration rate and kinetics of composting some agricultural wastes, 2004). La aplicación al suelo de la materia orgánica estabilizada e higienizada mediante compostaje, es el uso más adecuado para los residuos agroindustriales, ya que enriquece a los mismos en elementos nutritivos y mejora sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Dick, y otros, 1993). En la práctica, el principal proceso biológico aplicado en el tratamiento de residuos sólidos es el compostaje (Tchobanoglous, y otros, 1993).

### **1.3. Gestión de residuos agroindustriales**

Una adecuada gestión de residuos, puede lograr en muchos casos un desarrollo limpio de los procesos agrícolas, evitando la contaminación puntual y los conflictos que de ella se generan, por tal motivo es una práctica muy necesaria en toda actividad agroindustrial. La misma requiere de planificación sobre la gestión de los residuos.

La gestión de residuos debe cumplir con tres objetivos:

- a) Reducción de los residuos en la fuente.
- b) Aplicación de tratamientos con el fin de conferir una calidad acorde con el destino final de los residuos.
- c) Planificación y control del destino y uso del producto.

La tendencia mundial actual es la de considerar a los residuos agroindustriales como subproductos, más no como desechos. El destino principal de estos subproductos son la alimentación animal o el compostaje. Para esto, se aplica un tratamiento a los residuos, un conjunto de operaciones que cambian las características físicas, químicas o biológicas de los mismos, con el fin de disminuir o erradicar las sustancias peligrosas que contiene (The science of composting, 1997).

Los tratamientos aplicados en el medio a residuos agroindustriales más comunes son la utilización de aditivos, separación física, combustión, compostaje, entre otros, pudiendo realizarse combinaciones de los mismos, dependiendo del producto final que se desea obtener.

#### ***1.3.1. Incorporación de aditivos***

En esta práctica se adiciona un producto químico o biológico, a la fracción líquida de la materia orgánica para modificar las características de sus efluentes, reducir las emisiones de gases contaminantes, prepararlas para la siguiente fase de un tratamiento, o aplicarlas al suelo. Se pueden usar diferentes tipos de aditivos como aditivos microbiológicos, agentes enmascaradores, bloqueantes, adsorbentes y absorbentes, aditivos químicos, entre otros. El principal inconveniente de este tratamiento es que ciertos aditivos pueden ser efectivos para una cosa, pero perjudiciales para otra.

### ***1.3.2. Separación sólido-líquido***

Es un proceso físico de separación que produce dos fracciones: una sólida y una líquida, a menudo en este tratamiento se añade un agente floculante para optimizar significativamente la separación. Este proceso disminuye la producción de olores, y facilita el transporte de la fracción sólida, sin embargo presenta inconvenientes referentes a requerimientos de manejo y costos de operación.

### ***1.3.3. Compostaje***

Es un proceso biológico aerobio de descomposición, que produce energía, en el cual parte de la materia orgánica de residuo se transforma en dióxido de carbono y agua, por acción de microorganismos sobre la misma. En este proceso se amplía la calidad del material de partida, se reduce su peso y volumen, a la vez que es higienizado.

### ***1.3.4. Digestión anaerobia***

Es un proceso de descomposición biológica en ausencia de oxígeno cuyo producto es el biogás (gas compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono), aprovechable energéticamente. La materia orgánica se estabiliza y mineraliza, se controla la generación de gases de efecto invernadero y olores. Es sumamente costoso, requiere constante control del proceso, se considera inestable por ser sensible a la presencia de muchos compuestos inhibidores o tóxicos, y poblaciones microbianas requeridas que pueden encontrarse desequilibradas.

### ***1.3.5. Nitrificación – Desnitrificación***

En este proceso microbiológico, se oxida el amonio a nitrato, en presencia de oxígeno y carbono inorgánico (nitrificación), posteriormente el nitrato se reduce a nitrógeno molecular, en ausencia de oxígeno y carbono orgánico (desnitrificación).

Se elimina la materia orgánica y el nitrógeno de la misma sin consumo de oxígeno, se reducen gases con efecto invernadero y de mal olor. Presenta inestabilidad y costos de implementación elevados, no se clasifica como un proceso de recuperación ya que el ciclo del nitrógeno no se cierra completamente, y produce fangos que deben ser tratados.

#### **1.3.6. Combustión**

Es una operación unitaria de oxidación térmica, descompone los residuos a altas temperaturas, produce cenizas que pueden concentrar metales pesados y residuos contaminantes. Se ha convertido en la opción de tratamiento para ciertos residuos especiales. Genera contaminación atmosférica, por producción de material particulado, COVs, y monóxido de carbono como resultado de una combustión incompleta.

Cada tratamiento definido anteriormente presenta ventajas y desventajas en aspectos ambientales y económicos, el éxito en la gestión de residuos agroindustriales radica en elegir el tratamiento más adecuado según el tipo de residuos a tratar, costos de implementación, leyes ambientales vigentes, etc. El método que presenta mayores ventajas para tratar los desechos agroindustriales provenientes de actividades agrícolas es el compostaje, sirve como una tecnología de tratamiento de desechos orgánicos sólidos cuyos objetivos son la inactivación de organismos patógenos, y obtener un producto estabilizado. Este producto puede integrarse en los propios suelos de cultivo, esto confiere al proceso características de reciclaje. Por lo tanto, el compostaje es la opción de tratamiento adecuada dentro de un plan general de manejo de desechos, que exigen las actuales normas ambientales del país.

#### **1.4. Leyes de gestión de residuos agroindustriales**

En Ecuador, a partir del año 2008, la Constitución reconoce los derechos de la naturaleza y se crean instancias que cuiden intereses en temas ambientales, obteniendo un reconocimiento internacional por ser pionera en materia ambiental.

Según la norma de calidad ambiental del recurso suelo, y criterios de remediación para suelos contaminados, la ley de gestión ambiental de la república ecuatoriana para la prevención y control de la contaminación ambiental establece:

- La prevención de la contaminación al recurso suelo se fundamenta en las buenas prácticas de manejo e ingeniería aplicada a cada uno de los procesos productivos. Se evitará trasladar el problema de contaminación de los recursos agua y aire al recurso suelo.
- Toda actividad productiva que genere desechos sólidos no peligrosos, deberá implementar una política de reciclaje de los desechos. Si el reciclaje no es viable, los desechos deberán ser dispuestos de manera ambientalmente aceptable.
- Las industrias y proveedores de servicios deben llevar un registro de los desechos generados, indicando volumen y sitio de disposición de los mismos.
- Los desechos pecuarios provenientes de granjas productoras, con atención especial a las granjas porcinas, avícolas, y aquellas instalaciones adicionales que la entidad ambiental de control considere, deberán recibir tratamiento técnico adecuado.

Por lo expuesto, se observa que la legislación ecuatoriana pretende un manejo adecuado de los residuos, sin embargo al no ser rigurosa, es en muchos casos inaplicable.

Es por tanto importante conocer los modelos de sistemas y normas de gestión ambiental de organizaciones que han marcado pautas trascendentales a través de la historia, establecidos para mitigar los impactos ambientales generados por las actividades agroindustriales. Así podemos mencionar a las siguientes:

#### ***1.4.1. TULSMA***

La Ley de Gestión Ambiental vigente en Ecuador, tiene como objetivo principal la preservación de la calidad ambiental y el bienestar de los ecosistemas. El Texto Unificado de la Legislación Ambiental Secundaria del Ministerio del Ambiente, consta de nueve libros, el libro VI de la calidad ambiental consta de siete anexos, el anexo 6, denominado Norma de Calidad Ambiental para el Manejo y Disposición Final de Desechos Sólidos No Peligrosos, consiste en una norma técnica dictada bajo el amparo de la Ley de Gestión Ambiental y del Reglamento a la Ley de Gestión Ambiental para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental. Es de aplicación obligatoria y rige a nivel nacional. (Secretaría del Ambiente, 2012).

Esta norma establece los criterios para el manejo de los desechos sólidos no peligrosos, desde su generación hasta su disposición final. En el apartado 4.9 se establecen las normas generales para el tratamiento de desechos sólidos no peligrosos. (ANEXO A)

#### ***1.4.2. La Comisión Europea (European Commission, 2014)***

La Comisión Europea promueve el tratamiento biológico de residuos orgánicos mediante la armonización de las disposiciones nacionales en materia de gestión con el fin de prevenir o reducir cualquier impacto negativo de los mismos en el medio ambiente (ANEXO B).

#### ***1.4.3. La Agencia de protección ambiental (EPA)***

La Agencia de protección ambiental de Estados Unidos diseña guías para reducir los impactos negativos al suelo por actividades agrícolas. Estas guías tienen el carácter de recomendaciones y se desarrollan de forma que impulsen acciones para lograr una calidad de suelo que proteja la salud del ser humano y del medio ambiente. (EPA, 2015)

Se reconoce que los estándares determinados por cada país varían de acuerdo al acercamiento adoptado para balancear riesgos a la salud, factibilidad y consideraciones económicas y sociales (ANEXO C).

### **1.5. Compostaje**

#### ***1.5.1. Generalidades y definición***

El compostaje ha sido estudiado por varios autores: (Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity, 2008), (International Biodeterioration & Biodegradation, 2011), (Composting of a solid olive-mill by-product (“alperujo”) and the potential of the resulting compost for cultivating pepper under commercial conditions., 2006), (Technology and strategy of composting In: Environmental Processes – Wastewater and Waste Treatment., 2000) (co-composting of filter cake and bagasse; by-products from a sugar mill., 2005) (Co-composting of soybean residues and leaves in Hong Kong., 2001) quienes establecen que dichos sistemas de reciclaje orgánico son la base en la gestión de residuos propios para un buen aprovechamiento y bienestar de los cultivos.

El compostaje es un proceso biooxidativo controlado, que se desarrolla sobre sustratos orgánicos en estado sólido. Implica el desarrollo de una fase termofílica, siendo productos de la biodegradación el dióxido de carbono, agua, minerales y una materia orgánica estabilizada denominada compost, con



ciertas características húmicas, libre de compuestos fitotóxicos y agentes patógenos (Compost specifications for the production and characterization of compost from municipal solid waste. Compost: production, quality and use., 1987).

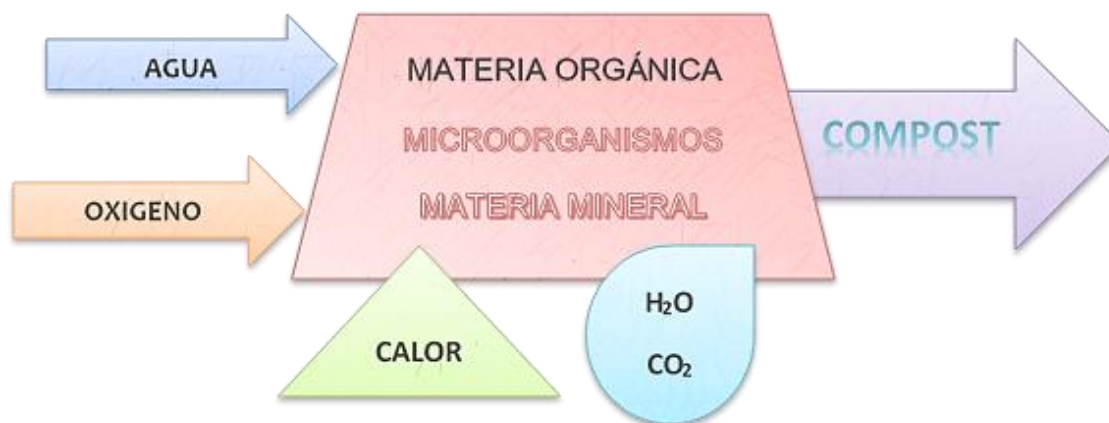
La descomposición aeróbica de estos residuos, debido a la actividad secuencial de microorganismos, es capaz de producir un producto estable, sin patógenos y rico en sustancias húmicas, en el que se generan elementos nutritivos que la planta ha extraído del suelo para su propio crecimiento y reproducción (Composting of sweet sorghum waste with other wastes, 1999). A lo largo del proceso, el oxígeno existente se consume y paralelamente genera  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , y en menor proporción amoníaco y otros compuestos volátiles. Para su aprovechamiento industrial, el proceso de compostaje puede ser acelerado mediante la optimización de las diversas variables que intervienen en él.

### ***1.5.2. Conformación del compost***

La cantidad y presencia de nutrientes en el material de partida son factores importantes que pueden limitar la descomposición biológica. El carbono y el nitrógeno juegan un papel fundamental en el crecimiento y actividad de los microorganismos, son la principal fuente para la generación de energía y la síntesis proteica, respectivamente. (Evaluation of two different aeration systems for composting two-phase olive mill wastes, 2006).

El producto del proceso, denominado compost, se usa como fertilizante orgánico y acondicionador del suelo, por su capacidad para fijar nitrógeno y liberarlo progresivamente en el suelo durante las etapas de crecimiento vegetal. Se produce de manera natural y se caracteriza por la participación de microorganismos de metabolismo aerobio que producen incremento en la temperatura de la masa orgánica (Haug, 1993).

Los componentes principales y necesarios para que el proceso de compostaje tenga lugar, se muestran en el siguiente esquema, pudiendo variar la composición del mismo de acuerdo a la materia orgánica de la que se disponga, así como microorganismos y demás nutrientes procedentes de la misma mezcla de materiales, o de líquidos adicionados a la misma.



**Figura 2-1** Esquema general del proceso de compostaje

Fuente: (UPM, 2012)

Realizado por: Víctor Valverde 2015

### ***1.5.3. Usos del compost***

El uso principal del compost sigue siendo el de enmienda o fertilizante orgánico en procesos agrícolas. Se usa como sustrato para el cultivo en maceta, pero también se puede emplear en actividades como:

- Estabilización y regeneración de taludes.
- Recuperación de terrenos empobrecidos.
- Restauración de áreas de vertederos incontrolados.
- Herramienta contra la erosión: fijación del suelo y estabilización de terrazas.
- Formación de pantallas y barreras vegetales.
- Aplicación de filtros de tierras para la retención de malos olores.

### ***1.5.4. Ventajas y desventajas del compostaje***

El proceso de compostaje o fermentación en medio sólido (FMS) surge como una tecnología para la generación de productos orgánicos con alto contenido de nutrientes. El uso de residuos agro-industriales como sustratos en procesos de FMS hace de esta actividad un proceso de reaprovechamiento y adición de valor a los residuos orgánicos.

Otras de sus ventajas son (Amigos de la Tierra, 2009):

- Reduce la cantidad de residuos producidos.
- Presenta costos competitivos con otras tecnologías de manejo de residuos.
- Los medios de cultivo son simples, generalmente se emplean subproductos agrícolas con alto contenido de nutrientes.
- Su limitada disponibilidad de agua es de gran ayuda para evitar la contaminación por bacterias y levaduras.
- El producto final no es contaminante.
- Los procesos de separación o purificación y de disposición de desperdicios son simples.

Sin embargo, este tipo de fermentación tiene algunas desventajas, entre las que destacan (Casco, y otros, 2008):

- La remoción del calor metabólico generado durante el crecimiento puede ser un problema, especialmente a grandes escalas.
- La naturaleza sólida del sustrato dificulta el monitoreo de parámetros del proceso.
- Es difícil garantizar la correcta distribución de cualquier sustancia añadida al proceso, el control de variables tales como el pH, contenido de humedad y concentración de sustrato es virtualmente imposible.
- Los aspectos científicos y de ingeniería están pobremente señalados en la FMS. Muchas de las contribuciones obtenidas a fecha son cualitativas o empíricas debido a las dificultades encontradas para su cuantificación.

#### ***1.5.5. Características del proceso de compostaje***

El proceso al ser biooxidativo, es por tanto biológico, esto lo diferencia de otros tratamientos de tipo físico o químico, teniendo lugar una actividad eminentemente aeróbica.

Es un proceso controlado, lo que evidencia la necesidad de una monitorización y control de los parámetros durante el desarrollo del mismo, diferenciándolo de los procesos naturales.

Tiene lugar en sustratos orgánicos en fase sólida, generalmente heterogéneos, que actúan como soporte físico, fuente y matriz de intercambio de nutrientes, y agua, necesarios para el metabolismo

microbiano, retiene los residuos metabólicos generados a la vez que actúa como aislante térmico del sistema (Finstain, y otros, 1993).

Libera energía calórica, lo que provoca un incremento en la temperatura, principal indicador de la dinámica del proceso, de modo que un lento o escaso incremento de la misma debe interpretarse como un desarrollo no favorable de éste y/o un deficiente control de los factores que lo rigen. Parámetros como la temperatura y la humedad, junto a la composición del sustrato, inciden enormemente en el desarrollo del proceso.

Libera dióxido de carbono y agua a la vez que se generan sustancias minerales, como principales productos de la biodegradación. Idealmente, los productos finales de un sistema de compostaje bien manejado son dióxido de carbono, vapor de agua, calor, materia orgánica estabilizada y amoníaco; la proporción de éstos varía con la disponibilidad de carbono y nitrógeno en el residuo y con las condiciones que presenta el proceso en cada etapa (Keener, y otros, 1993).

Genera temporalmente compuestos fitotóxicos, siendo esta producción mínima y menos duradera al emplear sustratos heterogéneos y bajo condiciones claramente aeróbicas. Pero el mismo proceso luego se encarga de degradar los compuestos fitotóxicos, a compuestos como los polifenoles, para producir un compost sin carácter fitotóxico. Por estas razones, el compostaje se considera un tratamiento eficaz para el tratamiento de residuos agrícolas, produciendo material orgánico estable y con alto contenido de nutrientes, adecuado para su uso como enmienda en el suelo.

#### ***1.5.6. Economía del proceso***

Este tipo de tratamiento de residuos sólidos generalmente presenta costos de implementación relativamente bajos, en dependencia del grado de tecnificación empleado. El compostaje a menudo se emplea como un medio de tratamiento de grandes cantidades de residuos sólidos en los que los costos crecen en relación directa con la cantidad de desechos a tratar, más no como generadora de beneficios económicos. Se debe considerar la técnica de compostar con sus diversas variantes, como una técnica ecológica, amigable con el medio ambiente, económica y fácil de implementar, que a diferencia de los otros sistemas de gestión de residuos que se manejan, provee un producto tratado con características nutricionales de alta calidad que convierte residuos en insumos, dentro del mismo proceso.

Varios investigadores consideran que el valor monetario comercial del compost será pequeño, en relación al capital y costo de operación de las actividades de las que proceden los residuos. Pero la rentabilidad en esta práctica no reside en la venta de los productos generados en el proceso; sino más bien en minimizar los problemas de contaminación que causan los residuos para las actividades agrícolas de donde proceden. Esto conduce a la presente investigación hacia la búsqueda de un proceso funcional y económico, que permita obtener materia con características diferentes a las iniciales, aceptadas por las instancias de control de salud pública y medioambiental.

Por otra parte, las instalaciones de una planta de compostaje deben ser públicamente aceptables en términos de estética, aprovechamiento de recursos, funcionalidad y sanidad, esto se logra con una adecuada definición de la estructura, y un control del proceso en todas sus etapas; algo necesario, y que inevitablemente genera gastos económicos.

#### ***1.5.7. Etapas del proceso de compostaje***

En el proceso de compostaje, la materia orgánica atraviesa una serie de transformaciones causadas por los microorganismos que la degradan, pueden definirse cuatro etapas claramente marcadas a lo largo del proceso:

##### **I. Etapa mesofílica o de activación**

En esta etapa abundan las bacterias y hongos mesofílicos. Debido a la actividad metabólica de todos estos microorganismos la temperatura aumenta hasta 40 °C, el pH disminuye desde un valor neutro hasta 5.5-6 debido a la descomposición de lípidos y glúcidos en ácidos pirúvicos y de proteínas en aminoácidos, lo que favorece la aparición de hongos mesofílicos más tolerantes a las variaciones del pH y humedad. En esta etapa la relación C/N es de especial importancia ya que el carbono aportara la energía a los microorganismos y el nitrógeno es esencial para la síntesis de nuevas moléculas. El color en esta etapa aun es fresco y presenta un característico olor a frutas, verduras y hojas frescas. (Vilarino, y otros, 2009).

## **II. Etapa termofílica o de calentamiento**

La temperatura continúa ascendiendo hasta llegar a 75 °C, las poblaciones de bacterias y hongos mesofílicos mueren o permanecen en estado de dormancia, mientras que las bacterias termofílicas, actinomicetos y hongos termofílicos encuentran sus condiciones de desarrollo óptimas, generando incluso más calor que las bacterias mesófilas. La degradación de los ácidos obtenidos en la etapa anterior provoca el incremento del pH pasando desde 5.5 hasta 7.5, valor que se mantendrá casi constante hasta el final del proceso, el color del compost se pone más oscuro paulatinamente y el olor original se comienza a sustituir por olor a tierra. (Vilarino, y otros, 2009). Es en esta etapa cuando comienza la esterilización del residuo debido a las altas temperaturas, la mayoría de las semillas y patógenos como E.Coli mueren al estar sometidos durante días a temperaturas superiores a 55 °C (Peña, 2002).

## **III. Etapa de enfriamiento**

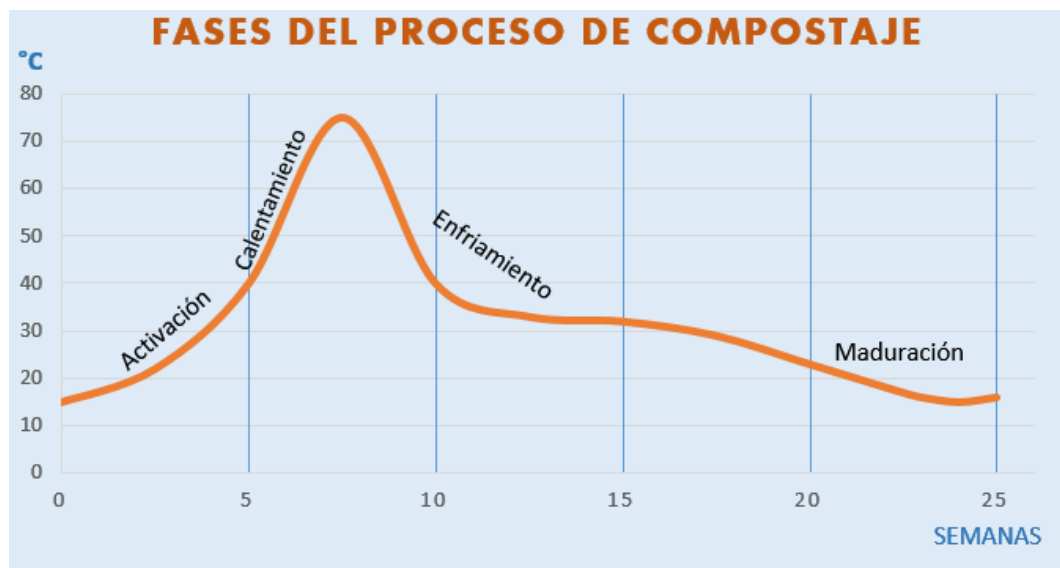
Una vez que los nutrientes y energía comienzan a escasear, la actividad de los microorganismos termofílicos disminuye, consecuentemente la temperatura en la pila desciende desde los 75 °C hasta la temperatura ambiente, provocando la muerte de los anteriores y la reaparición de microorganismos mesofílicos al pasar por los 40-45 °C, estos dominarán el proceso hasta que toda la energía sea utilizada (Casco, y otros, 2008).

## **IV. Etapa de maduración**

Posteriormente, la temperatura y pH se estabilizan, si el pH es ácido, esto es un indicador de que el compost no está en estado de total madurez, los actinomicetos adquieren especial importancia en la formación ácidos húmicos y son frecuentemente productores de antibióticos que inhiben el crecimiento de bacterias y patógenos, mientras que los macro organismos tales como nematodos, rotíferos, escarabajos, lombrices, etc. incrementan su actividad desempeñando la función de remover, excavar, moler, masticar y en general romper físicamente los materiales incrementando el área superficial de estos para permitir el acceso de los microorganismos. (Vilarino, y otros, 2009).

El color del producto final suele ser negro o marrón oscuro y posee olor a tierra de bosque, ya no se reconocen los residuos iniciales.

En la siguiente grafica se observa las variaciones de temperatura que presenta la pila de compostaje a través del tiempo, lo cual facilita la identificación de las etapas características del proceso.



**Figura 3-1** Gráfica temperatura vs tiempo de compostaje  
Realizado por: Víctor Valverde 2015

#### ***1.5.8. Factores que intervienen en el proceso de compostaje***

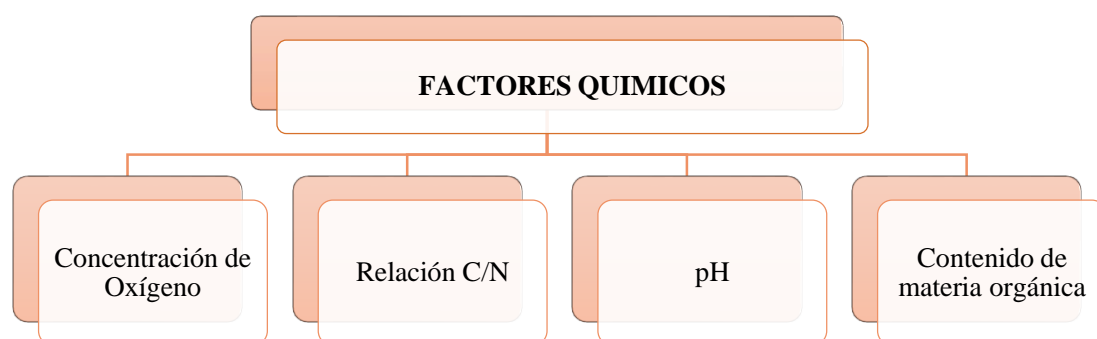
Existen factores en el proceso de compostaje que vuelven complicado su estudio, se consideran tanto factores físicos, como químicos y biológicos. Existen modelos que permiten predecir el comportamiento de algunos de estos factores de manera aproximada. Estos factores afectan al proceso de compostaje, tales pueden ser la temperatura, contenido de humedad, concentración de oxígeno, espacio de aire libre, degradación del material, ventilación, evaporación, crecimiento microbiano, etc.

La humedad y ventilación, así como una selección adecuada de los residuos a tratar y cantidades de los mismos son esenciales para maximizar la actividad microbiana, y por consiguiente la velocidad de degradación del material. La primera se debe mantener siempre entorno 40-60 %, ya que el agua distribuye los nutrientes por la masa (C, N, P, K, B, Ca, Mg, Na, etc.). La ventilación debe ser adecuada sobre todo en las tres primeras etapas, pero nunca excesiva ya que al igual que el sol puede secar demasiado la materia a tratar. (Vilarino, y otros, 2009). Si la selección inicial del residuo no fue

adecuada o su área superficial es muy reducida, la ventilación formará caminos preferenciales quedando otras zonas en ausencia de oxígeno.

Para un mejor entendimiento de los mismos se los ha clasificado de la siguiente manera:

### Factores químicos



**Figura 4-1** Factores químicos en el proceso de compostaje.

Realizado por: Víctor Valverde 2015

### Concentración de oxígeno

El oxígeno es vital para los microorganismos de respiración aeróbica y por tanto para cualquier proceso de compostaje. Por esta razón, la aireación del sustrato ha sido definida como el factor más importante (Optimization of the rate vinasse/grape marc for co-composting process, 2002). En condiciones aeróbicas, los microorganismos degradan rápidamente los carbohidratos disponibles en el residuo, y liberan grandes cantidades de energía para elevar la temperatura del compost dentro del rango termófilo, fundamental para lograr la estabilidad del compost (Evaluation of two different aeration systems for composting two-phase olive mill wastes, 2006).

Los principales métodos de aireación utilizados son: movimiento físico de la biomasa, convección natural del aire y aireación forzada. Las concentraciones óptimas de oxígeno para mantener el compostaje aerobio son del 10 %, considerando que valores menores al 5 % crean una descomposición anaerobia (Determination of aeration rate and kinetics of composting some agricultural wastes, 2004).



## **Nutrientes iniciales - Relación C/N**

La cantidad, presencia y relación de determinados nutrientes en el material de partida son factores determinantes de la descomposición biológica. El carbono y el nitrógeno desempeñan un papel fundamental para el crecimiento y actividad de los microorganismos, son la principal fuente para la generación de energía y la síntesis proteica, respectivamente.

Generalmente, residuos con una relación C/N inicial de 20 a 40 se consideran adecuados para iniciar un proceso de compostaje. Si la relación C/N inicial es demasiado baja, se producen pérdidas considerables de nitrógeno en forma de amoníaco. Si la relación C/N es demasiado alta el compostaje puede verse limitado por la falta de nitrógeno, lo que hace que la generación de calor en la pila sea insuficiente, desembocando en un incremento considerable en el tiempo de fermentación, hasta que el exceso de carbono es oxidado. (Thermophilic composting of food waste, 2006). Se considera como óptima una relación C/N entre 25-35 para el desarrollo idóneo de los microorganismos.

## **pH**

Mediante el seguimiento del pH se puede obtener una medida indirecta de la aireación del compost, ya que si en algún momento existen condiciones anaeróbicas el pH desciende. En la fase mesófila inicial se observa una disminución del pH por acción de los microorganismos sobre la materia orgánica más frágil, que produce una liberación de ácidos orgánicos. En la segunda fase se produce una alcalinización debido a la pérdida de los ácidos orgánicos y la generación de amoníaco procedente de la descomposición de proteínas. En la tercera fase, el pH tiende a aproximarse a la neutralidad, debido a la formación de los compuestos húmicos. A lo largo del proceso el pH debe mantenerse por encima de 7.5, que es un indicador de una buena descomposición.

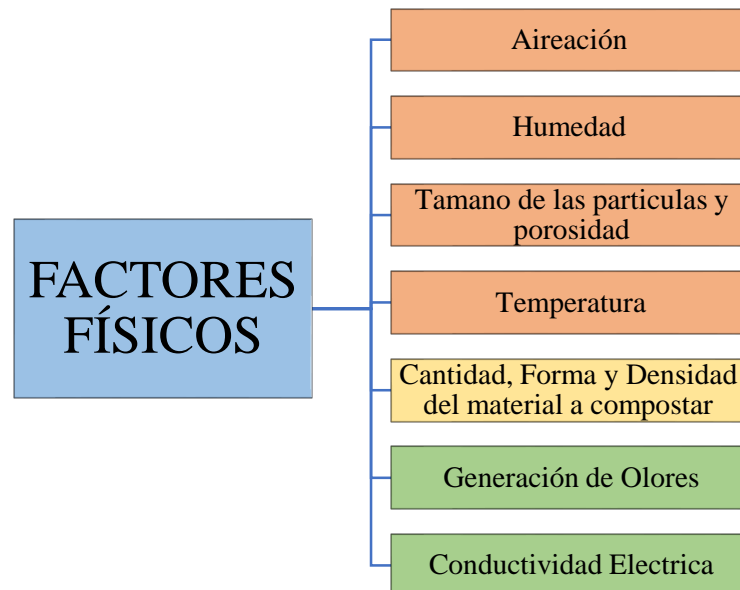
El monitoreo del pH no es necesario, ya que éste puede mantenerse en valores aceptables con una adecuada preparación de la mezcla a compostar, y controlando factores como la aireación, humedad y tamaño de partícula del material (Cornell, 2013).

## Contenido de materia orgánica

El contenido de materia orgánica en el compost es fundamental, es el principal indicador de su calidad agronómica (Kiely, 1999).

Durante el proceso, el contenido de materia orgánica tiende a descender debido a la mineralización y pérdida de carbono en forma de anhídrido carbónico; estas pérdidas pueden llegar a representar casi el 20 % en peso de la masa compostada (Compost specifications for the production and characterization of compost from municipal solid waste. Compost: production, quality and use., 1987). El descenso ocurre en dos etapas fundamentalmente. En la primera se produce una rápida disminución de los carbohidratos, transformando cadenas carbonadas largas en otras más cortas produciendo compuestos simples; algunos de los cuales se reagrupan para formar compuestos húmicos. En la segunda etapa, otros materiales más resistentes como las ligninas se van degradando lentamente y/o transformando en compuestos húmicos. Algunos compuestos procedentes de la materia orgánica son utilizados por los microorganismos para formar sus tejidos y otros son transformados en anhídrido carbónico y agua. Los nuevos materiales formados poseen unas características físicas y químicas distintas a las de los materiales originales (Haug, 1993).

## Factores físicos



**Figura 5-1** Factores físicos en el proceso de compostaje.  
Realizado por: Víctor Valverde 2015

## **Aireación**

La aireación es necesaria porque provee de oxígeno a los microorganismos aerobios, permitiendo así su metabolismo, respiración y crecimiento, mediante la oxidación de las moléculas orgánicas presentes en el material a compostar. Al principio de la actividad oxidante microbiana, la concentración de oxígeno en los espacios porosos de la mezcla de materiales se ubica en torno a un 15 o 20 % (similar a la composición normal del aire), y la concentración del dióxido de carbono varía entre valores de 0.5 y 5 %. Mientras ocurre la descomposición de la materia por la actividad biológica existente, la concentración de  $O_2$  baja y la concentración del  $CO_2$  aumenta. Si la concentración media de  $O_2$  llega a valores menores al 5 %, la descomposición del material se vuelve anaerobia. (Keener, y otros, 1993).

## **Humedad**

El agua es el medio de transporte de las sustancias solubles que sirven de alimento a las células, y de los productos de desecho de las reacciones que tienen lugar durante el proceso. La presencia de agua es imprescindible para el metabolismo microbiano. La humedad en la masa de compostaje debe garantizar que el agua no llegue a ocupar totalmente los poros de dicha masa, para que permita la circulación tanto del oxígeno como la de otros gases (Gordillo, et al., 2010).

La humedad no permanece constante a lo largo del proceso, la disminución continua de humedad es indicativa de la descomposición de materia orgánica (Composting based on moderately thermophilic and aerobic conditions for the production of commercial mushroom growing compost, 1990). Es uno de los parámetros clave en los sistemas de compostaje, y su control y monitoreo es de suma importancia. (The science of composting, 1997), (Effects of feedstock, airflow rate, and recirculation ratio on performance of composting systems with air recirculation, 2006).

(Determination of aeration rate and kinetics of composting some agricultural wastes, 2004), observaron en investigaciones con reactores aireados tanto por convección natural como mecánicamente, el contenido de humedad disminuía a lo largo del proceso de compostaje, alcanzando valores mínimos en condiciones óptimas de aireación. Por otra parte, un exceso de sequedad puede provocar la ralentización e incluso el cese de la actividad microbiana debido a la función del agua como medio de transporte de los nutrientes acuosos (The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend, 2003).

La humedad ideal presente en la materia durante el compostaje se ha establecido entre el 40 y el 60 % y depende del balance entre el agua contenida en los residuos originariamente, de su producción como resultado de la actividad biológica, de la humedad del aire utilizado y de las pérdidas causadas por su evaporación (Kiely, 1999), (Thermophilic composting of food waste, 2006). (Solid-state fermentation systems., 1980).

Poca humedad (<30 %) inhibe la actividad bacteriana, demasiada humedad (>65 %) da lugar a la descomposición lenta, a la producción de malos olores, crea regiones anaerobias y aumenta la lixiviación de nutrientes (Solid-state fermentations for biological delignification., 1989) (Mudgett, 1986).

### **Tamaño de las partículas y porosidad**

La estructura y el tamaño de las partículas influyen fuertemente en la capacidad de intercambio gaseoso. La porosidad y el tamaño de los poros son también parámetros críticos para una aireación óptima durante el proceso. Ambos parámetros tienen gran impacto en la resistencia al flujo de aire: cuanto mayor es la compactación y menor la porosidad del residuo, mayor será la resistencia. (Kiely, 1999). La oposición del compost al paso de aire es una de las variables clave a minimizar para el diseño de un sistema de aireación para compostaje. Es evidente que este parámetro depende de las características del sustrato (Compost Airflow Resistance, 2002).

La actividad microbiana ocurre generalmente en la superficie de las partículas orgánicas., por esta razón, cuando el tamaño de partícula disminuye, al aumentar el área superficial, se incrementa la actividad microbiana y el índice de descomposición. (Compost Airflow Resistance, 2002). Por otra parte, cuando las partículas son muy pequeñas y compactas, se dificulta la circulación de aire a través de la composta, reduciendo el oxígeno disponible para los microorganismos dentro del material y disminuyendo la actividad microbiana. Es por esta razón que para aumentar la porosidad, así como para ajustar la humedad del residuo a los valores óptimos, se añade una cierta cantidad de material poroso y/o desecante. Este material aumenta los espacios libres entre las partículas del residuo, minimizando la resistencia al flujo de aire y aumentando la capacidad de difusión del oxígeno. (Haug, 1993). Dimensiones recomendadas para el tamaño de las partículas de residuos, se han establecido entre 1 a 5 centímetros según (Effects of feedstock, airflow rate, and recirculation ratio on performance of composting systems with air recirculation, 2006).

## **Temperatura**

Es el indicador determinante del desarrollo del proceso. Cada grupo de microorganismos tiene una temperatura óptima para realizar su actividad, el grupo de microorganismos favorecido descompondrá la materia orgánica para obtener materia y energía, y emitirá calor, que puede hacer variar la temperatura de la pila de residuos.

Durante el proceso se observan tres fases en el proceso de descomposición aeróbica: fase mesófila inicial ( $T < 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), al final de la cual se producen ácidos orgánicos; fase termófila ( $T > 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ); y fase mesófila final, considerándose finalizado el proceso cuando se llega a la temperatura inicial. (Gordillo, et al., 2010).

Un proceso de descomposición aeróbica en el que la temperatura no supere los  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ , presentará una reducida capacidad de eliminación de patógenos. Además, es alrededor de este valor cuando se alcanzan las mayores velocidades de reacción. (Stentiford, 1996.).

Sin embargo, la temperatura depende del calor generado por la biomasa y del calor absorbido por la evaporación del agua principalmente, por lo que es un factor dependiente del resto de parámetros mencionados como humedad, tamaño de partículas, etc. (Process calorimetry on composting of municipal organic wastes, 2001). Tanto la temperatura como la respiración microbiana medida por la producción de  $\text{CO}_2$ , se utilizan como parámetros de seguimiento del proceso e indicadores de la estabilidad del producto final (The science of composting, 1997).

## **Cantidad, forma y densidad aparente del material a compostar**

La cantidad y forma del material a compostar, debe prevenir la disipación rápida del calor y de la humedad y también permitir su aireación. Un indicador importante de esta característica es la relación que existe entre la masa del material y su volumen, denominada densidad aparente, misma que depende de la humedad del producto, distribución de partículas, contenido de materia orgánica, grado de descomposición, etc. La densidad se va acrecentando con el tiempo de compostaje, como consecuencia de la descomposición y reducción de tamaño de las partículas. La mayor parte del compost presenta una densidad aparente entre 400 y  $700\text{ kg/m}^3$ .

## **Generación de olores**

Algunos de los inconvenientes del proceso de compostaje radican en las emisiones generadas durante el proceso, como lixiviados, olores y polvos, como consecuencia de la naturaleza de las sustancias involucradas y la descomposición de las mismas. El control de hedor es uno de los intereses primarios en las grandes instalaciones de compostaje, especialmente si se ubican cerca de áreas residenciales.

La buena gestión del proceso y su correcto diseño puede reducir los olores, pero en muchos casos todavía se requerirá algún método de tratamiento del olor. Existen opciones para el tratamiento del olor, como tratamientos químicos, destrucción térmica y la biofiltración, que es la opción más económica, ecológica y efectiva, y que se usa de manera generalizada actualmente.

## **Conductividad eléctrica**

Es la capacidad del sustrato para permitir el paso de la corriente eléctrica. La conductividad eléctrica de un compost está determinada por la naturaleza y composición del material de partida, fundamentalmente por su concentración de sales y en menor grado por la presencia de iones amonio o nitrato formados durante el proceso (Relationships between water-soluble carbohydrate and phenol fractions and the humification indices of organic wastes during composting., 1999).

Tiende generalmente a aumentar durante el proceso de compostaje al producirse un aumento de la concentración de nutrientes (Mathematical modelling of the composting process: A review, 2006).

## **Factores biológicos**

En el proceso de compostaje intervienen muchas poblaciones de microorganismos como bacterias, hongos, actinomicetos, entre otras, las mismas se suceden durante el proceso de compostaje en función de los cambios temperatura y pH principalmente. Algunos residuos orgánicos contienen suficientes microorganismos para su descomposición; otros no y en este caso se debe proveer de iniciadores de degradación (material que cuenta con huevecillos o microorganismos), para tal fin puede utilizarse composta madura, estiércol u otros materiales.

En la siguiente tabla se muestran los principales microorganismos patógenos involucrados en el proceso, así como las temperaturas a las que se desarrollan (Composting. A study of the Process and its principles, 1972).

**Tabla 1-1** Temperatura y tiempo necesarios para la destrucción de patógenos

<b>ORGANISMO</b>	<b>TEMPERATURA Y TIEMPO DE EXPOSICION</b>
<i>Salmonella thyphosa</i>	Son suficientes 30 min a 55-60 °C, no se desarrolla a temperatura superiores a 46 °C
<i>Salmonella sp.</i>	Se destruyen al exponerse 1 hora a 55 °C o 15- 20 minutos a 60 °C
<i>Shigella sp.</i>	Se destruyen al exponerse 1 hora a 55°C
<i>Escherichia Coli</i>	Mueren al exponerse 1 hora a 55 °C o 15-20 minutos a 60 °C
<i>Taenia Saginata</i>	Se elimina en unos pocos minutos a 55 °C
<i>Larvas de Trichinella spiralis</i>	Mueren rápidamente a 55 °C e instantáneamente a 60 °C
<i>Brucella abortus</i>	Se destruyen a 55 °C en 1 hora
<i>Micrococcus pyogenes Aureus</i>	Mueren después de 10 min a 50 °C
<i>Streptococcus pyogenes</i>	Mueren después de 10 min a 54 °C
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Mueren en menos de 1 hora a 55 °C

**Fuente:** (Composting. A study of the Process and its principles, 1972)

**Realizado por:** Víctor Valverde 2015

### Niveles óptimos de los factores del proceso

La siguiente tabla muestra los factores químicos y físicos importantes para un proceso de compostaje adecuado, y sus valores óptimos recomendados.

**Tabla 2-1** Niveles aceptables y óptimos de los factores físicos y químicos para el compostaje

<b>NÚM.</b>	<b>FACTOR CONSIDERADO</b>	<b>INTERVALO ACEPTABLE</b>	<b>VALOR ÓPTIMO</b>
<b>1</b>	Composición inicial de la mezcla, relación C/N	25:1 - 35:1	30:1
<b>2</b>	Potencial de hidrógeno en la mezcla inicial, pH	6.5 a 8.5	7
<b>3</b>	Contenido de humedad de la mezcla (%)	40-60	60
<b>4</b>	Contenido de oxígeno en la pila de compostaje (%)	> 5	> 10
<b>5</b>	Temperatura en la etapa termófila (°C)	Entre 40 y 65	60
<b>6</b>	Tamaño de partícula de los materiales (cm)	1 a 5	1-2

**Fuente:** Cornell Waste Management Institute

**Realizado por:** Víctor Valverde 2015

### ***1.5.9. Planta de producción de compostaje***

Una planta de compostaje es una instalación que permite el tratamiento aerobio de restos orgánicos de forma controlada para transformarlos en productos utilizables en sectores como la agricultura, jardinería, recuperación de suelos, horticultura, arboricultura, filtros biológicos, etc. (COMPOST SEGRÍA, 2013).

El fundamento de las estructuras para el tratamiento de los mismos, es el compostaje, dichas plantas tienen establecidas operaciones y sistemas para garantizar la generación de un producto en menor tiempo, y con características específicas.

#### **Etapas en una planta de compostaje**

Existen diversas combinaciones de operaciones físicas y químicas en las plantas de compostaje, pero en todas se reconocen tres etapas fundamentales (Tchobanoglous, y otros, 1993).

- Recolección de los residuos sólidos
- Pre procesamiento de los residuos sólidos
- Tratamiento y disposición final del compost.

#### **Recolección de los RS**

Incluye la recepción, separación de materiales recuperables, selección de materiales con características adecuadas, actividades necesarias en el proceso de elaboración del compost.

#### **Pre tratamiento de los RS**

Comprende la reducción de tamaño y el ajuste de las propiedades de los residuos para facilitar la descomposición de los mismos, los residuos se convierten en un sustrato de características definidas.

#### **Tratamiento y disposición final del compost**

Luego de que ha tenido lugar la degradación de la materia orgánica según la técnica de compostaje seleccionada (pilas estáticas, compostaje en naves abiertas o cerradas, compostaje en reactores, etc.) y una vez que el compost ha sido curado y estabilizado; se realiza la preparación final del producto, misma que puede incluir trituración fina, cribado, clasificación y dosificación de aditivos, granulado, puestas en sacos, almacenamiento, transporte y en algunos casos venta directa.



## Estructura física de la planta de compostaje

Para garantizar un desarrollo adecuado del proceso en una planta de compostaje, y su correcta operación, es necesario que la instalación posea diversos elementos como los siguientes:

- La instalación de una estructura tipo invernadero, dimensionada en base a la capacidad de residuos orgánicos que albergará la planta, misma que no permitirá el contacto con agua lluvia.
- El suelo debe evitar la entrada de agua lluvia, y la fuga de lixiviados, para lo que deben existir cunetas perimetrales, con sus adecuadas pendientes.
- Instalaciones:
  - Eléctricas/de control: Se proveerá de acceso a energía eléctrica para operar trituradoras, bombas, sistemas de control y demás artefactos eléctricos que posea la planta.
  - Sanitarias: Se requiere la disposición continua de agua, elemento necesario en todo sistema de compostaje, como parte del sistema de riego empleado para regular la humedad de las pilas de compostaje.
- Maquinarias: Para las operaciones antes mencionadas es necesario la utilización de artefactos eléctricos tales como bombas, sistemas de ventilación que suministren aire al sustrato, aparatos de medición tales como termómetros, higrómetros, medidores de oxígeno, pH, etc.
- Camino de acceso: Se requerirá de rutas de acceso que garanticen la operatividad en cualquier época del año.



**Figura 6-1** Planta de compostaje industrial

**Fuente:** (Muñoz, 2008)

Por lo general, en una planta de compostaje se cumplen las siguientes etapas de proceso en orden secuencial:



**Figura 7-1** Diagrama de flujo operativo general de una planta de compostaje

Realizado por: Víctor Valverde 2015

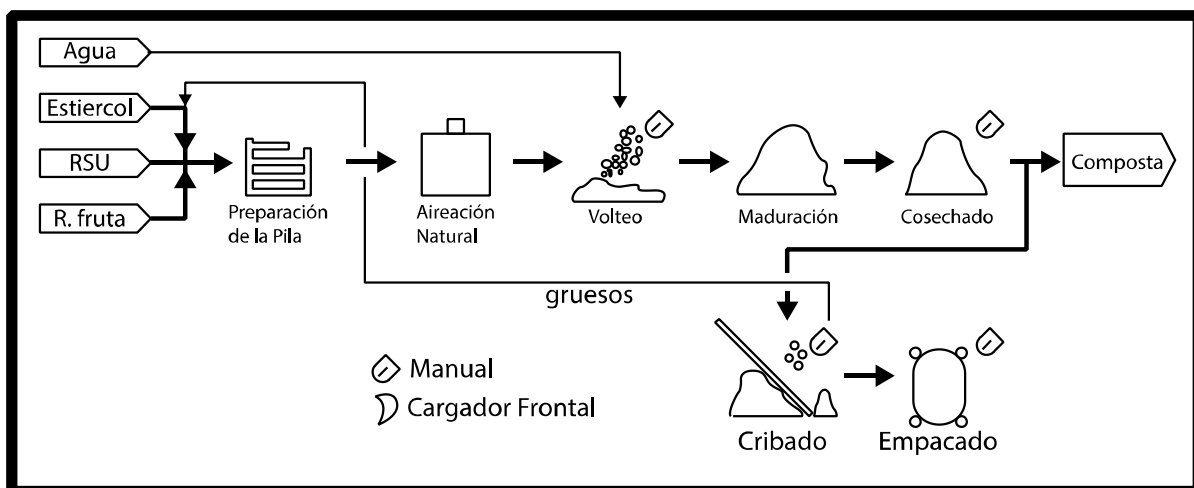
#### ***1.5.10. Tipos de operación en las plantas de compostaje***

El tipo de operación a emplearse en cada planta de compostaje se determina por los recursos humanos y técnicos disponibles, el financiamiento y la capacidad de tratamiento de la planta.

Se pueden por tanto, definir tres tipos de operaciones en una estación o planta de compostaje: Plantas de Operación Manual, Plantas Parcialmente Mecanizadas y Plantas Mecanizadas (Muñoz, 2008).

#### **Planta de operación manual**

Posee operación cien por ciento manual, es la de diseño más sencillo, involucra el mínimo personal posible. Es capaz de producir hasta 50 toneladas anuales de compost. Los procesos se realizan con herramientas de forma manual y no comprende uso de maquinaria alguna.



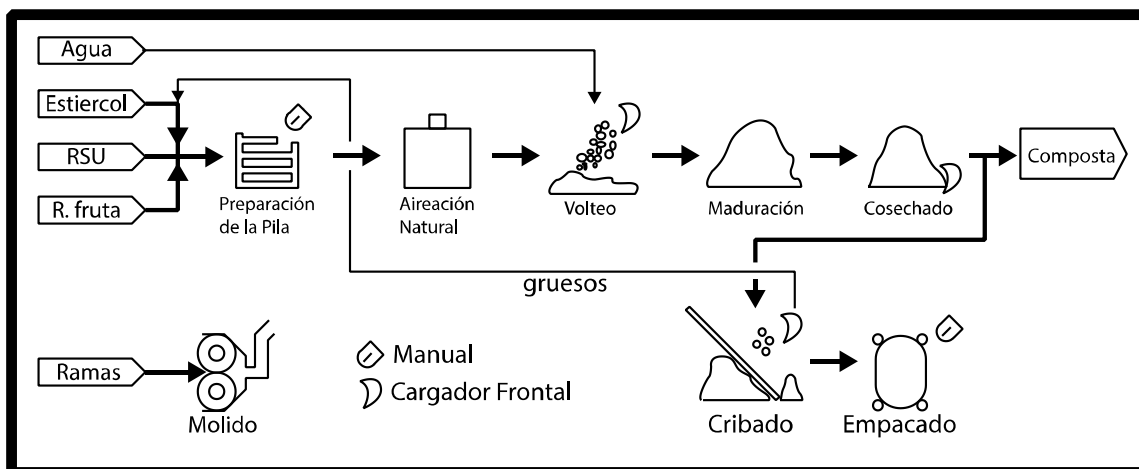
**Figura 8-1** Diagrama de proceso de una planta de compostaje de operación manual

Fuente: (Muñoz, 2008)

Realizado por: Víctor Valverde 2015

### Plantas parcialmente mecanizadas

Posee maquinaria que apoya en varias operaciones unitarias, la maquina más usada en este tipo de plantas es un tractor simple con retroexcavadora o cargador frontal para efectos de transporte de material y volteo de la mezcla de compost. Dicha maquina puede ser la opción más adecuada para operar en plantas de compostaje con una producción menor a 500 toneladas anuales de compost.



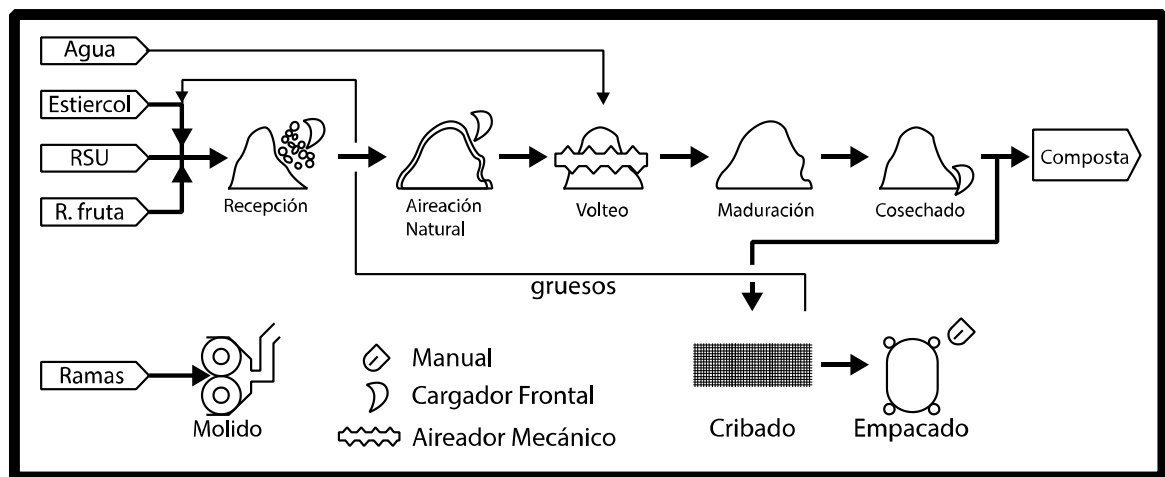
**Figura 9-1** Diagrama de proceso de una planta de compostaje parcialmente mecanizada

Fuente: (Muñoz, 2008)

Realizado por: Víctor Valverde 2015

## Plantas mecanizadas

Este tipo de planta es una combinación de plantas que operan en pilas, en naves cerradas y en reactores, en dependencia de los materiales a tratar, maquinaria y sistemas de control y monitoreo integrados, es indispensable un conocimiento muy especializado del proceso y contar con especialistas en ingeniería, microbiología y biotecnología, lo que eleva en gran medida los costos de operación de la misma.



**Figura 10-1** Diagrama de proceso de una planta de compostaje mecanizada

Fuente: (Muñoz, 2008)

Realizado por: Víctor Valverde 2015

### 1.5.11. Sistemas de compostaje

Existen varios métodos de compostaje para residuos orgánicos. Algunos se emplean en espacios exteriores, mientras que otros pueden ser empleados interiormente. El método de compostaje seleccionado dependerá de los materiales que van a conformar la composta, presupuesto, tiempo disponible, y del espacio físico del que se disponga para procesarlo. Pueden emplearse varios sistemas o combinaciones de ellos que van desde simples, baratos y que requieren relativamente poco esfuerzo, hasta sistemas más elaborados, que pueden ser costosos, dependiendo del grado de tecnificación que se les dé. Una clasificación general de los sistemas se ha establecido de la siguiente manera.

<b>SISTEMAS DE COMPOSTAJE</b>	<b>Sistemas abiertos.</b> La forma de amontonamiento del material es muy variado (pilas, mesetas, zanjas, etc.), así como sus métodos de manipulación.
	<b>Sistemas semi-cerrados.</b> En este tipo de sistemas las operaciones se realizan dentro de un contenedor cubierto y cerrado que dispone de un sistema de extracción de la atmosfera interior a través de tuberías, bajo este sistema se logra un mejor control de las operaciones.
	<b>Sistemas cerrados o compostaje en reactores.</b> El material a compostar nunca está en contacto directo con el exterior, sino a través de un sistema de conductos y turbinas, facilitando el tratamiento de los olores generados en el proceso, dando como resultado una degradación más rápida y completa minimizando el impacto ambiental.

**Figura 11-1** Clasificación general de los sistemas de compostaje

**Fuente:** (Muñoz, 2008)

**Realizado por:** Víctor Valverde 2015

Los distintos sistemas de compostaje intentan optimizar cada uno de los factores que intervienen en el compostaje. Las condiciones particulares de cada instalación y método para compostar deben evaluarse para desarrollar un proceso exitoso. Actualmente con un mejor entendimiento de los aspectos de ingeniería sobre el modelamiento matemático del proceso y el diseño de biorreactores, es posible escalar los procesos de FMS (Solid-state fermentation, 2003).

Los métodos de compostaje más usados en la actualidad son los siguientes:

### **Compostaje en pilas estáticas (Windrows)**

La tecnología usada para este sistema de compostaje en pilas es relativamente simple, es el sistema más económico y de uso más extendido. Los materiales pre tratados se amontonan sobre el suelo o pavimento, sin comprimirlos en exceso, siendo muy importante la forma y medida de la pila.



**Figura 12-1** Pilas de compostaje estáticas

**Fuente:** Cornell Waste Management Institute

Las pilas son ventiladas por convección natural. El tamaño y la forma de las pilas se diseñan para permitir la circulación del aire a lo largo de la pila y dependen del tamaño de partícula, contenido de humedad, porosidad y nivel de descomposición. Si las pilas son demasiado grandes, no se oxigena la mezcla adecuadamente, mientras que si son demasiado pequeñas no se calentarán adecuadamente.

Una vez constituida la pila, la única gestión necesaria es el volteo o mezclado con una máquina adecuada. El proceso logra buenos resultados de una amplia variedad de residuos orgánicos y funciona satisfactoriamente mientras se mantienen las condiciones aerobias y el contenido de humedad.

Se recomienda realizar el compostaje en naves cubiertas, sin paredes, para reutilizar el agua de los lixiviados para controlar la humedad de la pila. Las medidas óptimas de las pilas oscilan entre 1.2 -2 metros de altura, por 2-4 metros de ancho, siendo la longitud variable. La duración del proceso es de unos dos o tres meses, más el periodo de maduración.

### **Compostaje en pilas estáticas ventiladas (Sistema Rutgers)**

Es el siguiente nivel de sofisticación en tecnología de compostaje, en este se colocan los materiales sobre un conjunto de tubos perforados, conectados a un sistema que aspira o insufla aire a través de la pila. Una vez que se constituye la pila, no se toca, en general, hasta que la etapa activa de compostaje sea completa. Cuando la temperatura en el material excede el valor óptimo, sensores que

controlan la temperatura activan un dispositivo de inyección de aire para enfriar la pila abasteciéndola de oxígeno.



**Figura 13-1** Pilas de compostaje ventiladas

**Fuente:** (INFOAGRO, 2013)

Las pilas estáticas ventiladas se suelen usar para materiales homogéneos como los fangos, restos de poda y cosecha, etc., que mezclados con un substrato seco y poroso como astillas de madera o serrín, y agua forman una película líquida delgada en la que tiene lugar la descomposición.

Este sistema permite la rápida transformación de residuos orgánicos en fertilizantes. La ventilación controlada impulsa la actividad de los microorganismos artífices del proceso de compostaje. El sistema es económico por la poca mano de obra que se requiere. El proceso suele durar de 4 a 8 semanas, y luego se apila el producto durante 1 a 2 meses para que acabe de madurar. Puede usarse en combinación con otras tecnologías de compostaje. Con un adecuado pre-tratamiento de los residuos orgánicos, el exceso de humedad y las condiciones anaerobias de fermentación, así como el tiempo de tratamiento pueden reducirse.

### **Sistemas aislados**

Los procesos en túneles, contenedores o en tambor son procesos modulares que permiten ampliar la capacidad de tratamiento, añadiendo las unidades de tratamiento necesarias. El recipiente puede ser cualquier cosa, desde un silo a un foso de hormigón. Como se trata de sistemas aislados, es posible tratar los olores producidos por una eventual descomposición anaerobia.





**Figura 14-1** Compostaje aislado en silos de hormigón

**Fuente:** (Amigos de la Tierra, 2009)

Los sistemas de silos confían en la gravedad para mover el material a través del mismo, y la carencia interna de mezcla tiende a limitar la aplicación de estos silos a materiales homogéneos. Otros sistemas en contenedores pueden incluir sistemas de mezcla interna que mueve los materiales a través del contenedor. Presenta ventajas de bajo consumo energético, y poco personal necesario para la operación.

### **Compostaje en tambor**

Este proceso de compostaje se realiza en tambores de rotación lenta. Estos tambores pueden trabajar en continuo o por cargas y son de diferentes tamaños y formas. Están contruidos en acero y la mayoría de ellos incorporan aislamiento térmico. El residuo orgánico, una vez pesado y registrado, se deposita mediante pala cargadora, sin más preparación, directamente al alimentador de los tambores de compostaje. La alimentación del residuo y su distribución dentro del tambor se realiza de forma totalmente automática. El material es descompactado, homogeneizado y desfibrilado dentro del tambor con un resultado óptimo.



### Compostaje en túnel

La descomposición de materia tiene lugar en un túnel cerrado, generalmente fabricado en hormigón, con una vía de ventilación controlada por impulsión o aspiración, para el aporte de  $O_2$ , imprescindible para los microorganismos.



**Figura 15-1** Compostaje en túnel  
Fuente: reciclajeverde.com

### Compostaje en nave

Tiene lugar en una nave cerrada. La ventilación se realiza con ayuda de diferentes tipos de unidades rotativas (volteadoras). Las plantas modernas están totalmente automatizadas y equipadas con volteadoras, las cuales se mueven por medio de grúas elevadoras y alcanzan el compostaje total del área de la nave.



**Figura 16-1** Compostaje en nave  
Fuente: reciclajeverde.com

Existen varios sistemas y combinaciones de los mismos empleados actualmente en materia de tecnología para compostar, es criterio del diseñador o ejecutor de la planta de compostaje seleccionar las operaciones unitarias, sistemas de aireación, humidificación y volteo, recursos económicos, materiales y humanos que garanticen un correcto desempeño del proceso (COMPOST SEGRIÁ, 2013).

Uno de los sistemas más económicos, debido a la reducción en mano de obra, mínima tecnología involucrada, y control de una de las variables más importantes del proceso, la temperatura, es el sistema de pilas estáticas ventiladas mediante el uso de aireación forzada, también denominado sistema Rutgers (Haug, 1993).

## **1.6. Investigaciones análogas sobre el compostaje**

Diversos estudios y experimentos se han realizado en torno al compostaje de materia orgánica en diversas partes del mundo, mismos que reportan materiales usados, condiciones óptimas de desarrollo del proceso, equipos y metodología, evaluaciones de calidad del compost, resultados de análisis de los materiales de partida, así como del compost al final del proceso, como los siguientes:

### ***1.6.1. Co-Compostaje de residuos de destilería con estiércol de animales: transformaciones de carbono y nitrógeno en la evaluación de la estabilidad del compost***

En un estudio publicado en la revista CHEMOSPHERE que tiene por título “Co-compostaje de residuos de destilería con estiércol de animales: Transformaciones de carbono y nitrógeno en la evaluación de la estabilidad de compost” realizado por (Co-composting of distillery wastes with animal manures: Carbon and nitrogen transformations in the evaluation of compost stability, 2008) se estableció como objetivo estudiar la viabilidad del reciclaje de los residuos sólidos generados por la industria de la destilería por medio del co-compostaje con estiércol de animales, así como evaluar la calidad de los composts obtenidos.

Para la investigación se instauraron dos pilas de compostaje, utilizando residuos agotados de una destilería de uvas, estiércol de ganado y estiércol de aves de corral, respectivamente (en proporciones, de 70:30), los residuos fueron compostados mediante el sistema Rutgers.

Durante todo el proceso de compostaje, se controlaron parámetros como pH, conductividad eléctrica, cantidad de materia orgánica, carbono soluble en agua, polifenoles solubles en agua, diferentes formas de nitrógeno (nitrógeno orgánico, amonio y nitrato), índices de humificación, capacidad de intercambio catiónico, así como el índice de germinación.

Las pérdidas de materia orgánica siguieron una ecuación cinética de primer orden en ambas pilas, la más alta tasa de mineralización de la materia orgánica se observó con los residuos agotados de uva y estiércol de vaca. Se evidenció un aumento de la capacidad de intercambio catiónico, lo que reveló la humificación de la materia orgánica durante el compostaje.

Para el experimento se prepararon dos pilas de compostaje con abonos de dos animales diferentes: estiércol bovino (EB) y gallinaza (EG). Las mezclas se prepararon en las siguientes proporciones:

Pila 1, 70 % RS + 30 % EG (80:20);

Pila 2, 70 % RS + 30 % EB (79:21).

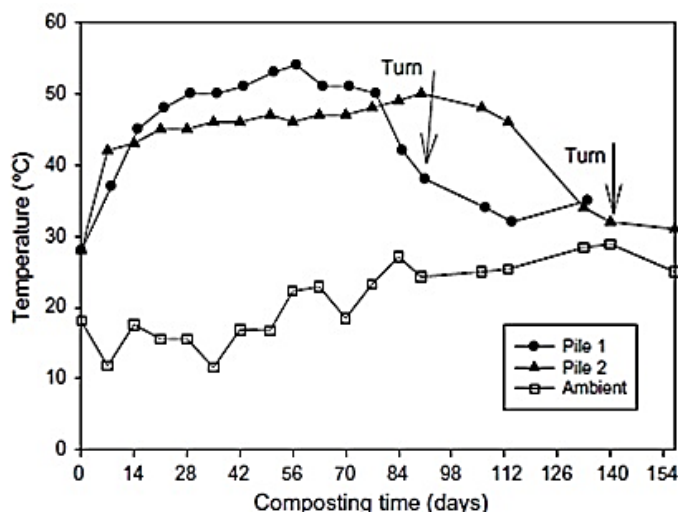
Las mezclas (de unos 1.800 kg cada una) fueron compostados en una planta piloto, en pilas trapezoidales (1,5 m de altura con una base de 2x 3 m), con la participación de ventilación bajo demanda a través del control de temperatura por retroalimentación que mantenía una temperatura máxima en la pila de 55 °C. El aire fue soplado desde la base de la pila a través de agujeros en las paredes de tres tubos de PVC de longitud 3 m y 12 cm de diámetro.

El temporizador para la ventilación se fijó en 30 segundos cada 30 minutos. Ambas pilas se voltearon una vez durante el proceso, cuando la temperatura comenzó a disminuir, a fin de mejorar tanto la homogeneidad de los materiales como el desarrollo del proceso.

Se utilizó la aireación forzada durante la fase bio-oxidativa: de 134 días en la pila 1 y 157 días en la pila 2. La fase bio-oxidativa del compostaje se consideró terminada cuando la temperatura se acercó al valor externo y no ocurrió recalentamiento. La inyección de aire fue entonces detenida para permitir que el compost pueda madurar por un período de aproximadamente dos meses. La humedad de las pilas se controló semanalmente adicionando la cantidad necesaria de agua para obtener un contenido de humedad de no menos de 40 %. Los lixiviados de las pilas, se recogieron y añadieron de nuevo a las pilas.

Las pilas se muestrearon aproximadamente cada dos semanas durante la fase bio oxidativa y después del período de maduración.

Ambas pilas mostraron una tendencia de la temperatura de compostaje típica, lograron temperaturas termófilas (>40 °C) durante las primeras dos semanas de compostaje; y el mantenimiento de la fase termofílica aproximadamente 76 y 122 días para las mezclas 1 y 2, respectivamente. La pila 2 alcanza los valores de temperatura termófilas más rápido y tiene una fase termófila más larga que la pila 1.



**Figura 17-1** Gráfica de variación de temperatura vs tiempo de compostaje

**Fuente:** (Co-composting of distillery wastes with animal manures: Carbon and nitrogen transformations in the evaluation of compost stability, 2008)

Los resultados del compost producido en el experimento son los siguientes.

**Tabla 3-1** Concentraciones de nutrientes y metales pesados en el compost maduro

Nutrient and heavy metal concentrations of the mature composts (dry weight basis)		
	Compost 1	Compost 2
<i>Macroelements (g kg<sup>-1</sup>)</i>		
N <sub>T</sub>	29.1	41.2
P	5.38	9.61
Na	5.03	3.18
K	19	20
Ca	32	64
Mg	5.25	5.14
<i>Microelements (mg kg<sup>-1</sup>)</i>		
Fe	1355	1028
Mn	129	150
Cu	36	45
Zn	140	171
<i>Heavy metals (mg kg<sup>-1</sup>)</i>		
Co	19	33
Cr	9	8
Cd	<1	3.2
Pb	16	52
Ni	10	16
Hg	<0.05	<0.05
As	<0.5	2.4

**Fuente:** (Co-composting of distillery wastes with animal manures: Carbon and nitrogen transformations in the evaluation of compost stability, 2008)

### ***1.6.2. Evaluación de la estabilidad y madurez durante la aireación forzada de compostaje estiércol de pollo y serrín a diferentes relaciones C / N***

Otra investigación realizada por (Evaluation of stability and maturity during forced-aeration composting of chicken manure and sawdust at different C/N ratios, 2010) examinó parámetros fisicoquímicos y biológicos con el fin de evaluar la estabilidad y madurez del producto de compostaje de estiércol de pollo mezclado con diferentes cantidades de serrín mediante aireación forzada. Se establecieron relaciones C/N iniciales de 12, 18 y 28. Se usó Estiércol de pollo. El serrín se obtuvo de un aserradero. El serrín que tiene un relativamente alto contenido de Carbono, se utiliza como agente de carga con el fin de ajustar la Relación C/N. Tanto el estiércol de pollo y el aserrín se mezclaron en diferentes proporciones de 16.3:1; 6.9:1 y 3.4:1 en peso del producto fresco, produciendo relaciones iniciales de C/N de 12, 18 y 28, respectivamente. Las propiedades fisicoquímicas de los materiales de partida se muestran en la tabla siguiente.

Tres mismos sistemas de compostaje mediante aireación forzada se establecieron en el estudio. El proceso de compostaje de cada mezcla fue llevado a cabo en un reactor con volumen de 600 L con dimensiones de 80 cm de largo, 72 cm de ancho y 132 cm de alto, llenados de las mezclas de compostaje estudiadas. Una placa perforada de PVC se utiliza en la parte inferior de cada reactor para mantener la mezcla de compostaje y distribuir el aire por igual. El sistema de compostaje fue conectado a un soplador, que proporciona aire en el reactor desde la parte inferior. Un controlador combinado de tiempo y temperatura se aplica para controlar la aireación. El caudal de aire se regula a 180 L min<sup>-1</sup>. El funcionamiento del soplador de aire varía en función de la temperatura de la siguiente manera:

- (i) Aireación continua cuando la temperatura de la masa de compostaje supera el valor de 65 °C
- (ii) Aireación intermitente de acuerdo con un ciclo preestablecido de 5 min de aireación y 5 min de pausa, cuando la temperatura se encuentra entre 55 y 65 °C
- (iii) Aireación intermitente de acuerdo con un ciclo preestablecido de 5 min de aireación seguido por 10 min de pausa cuando la temperatura estaba por debajo de 55 °C.
- (iv) Aireación intermitente de acuerdo con un ciclo preestablecido de 5 min de aireación seguido por 60 min de pausa durante la fase de maduración.

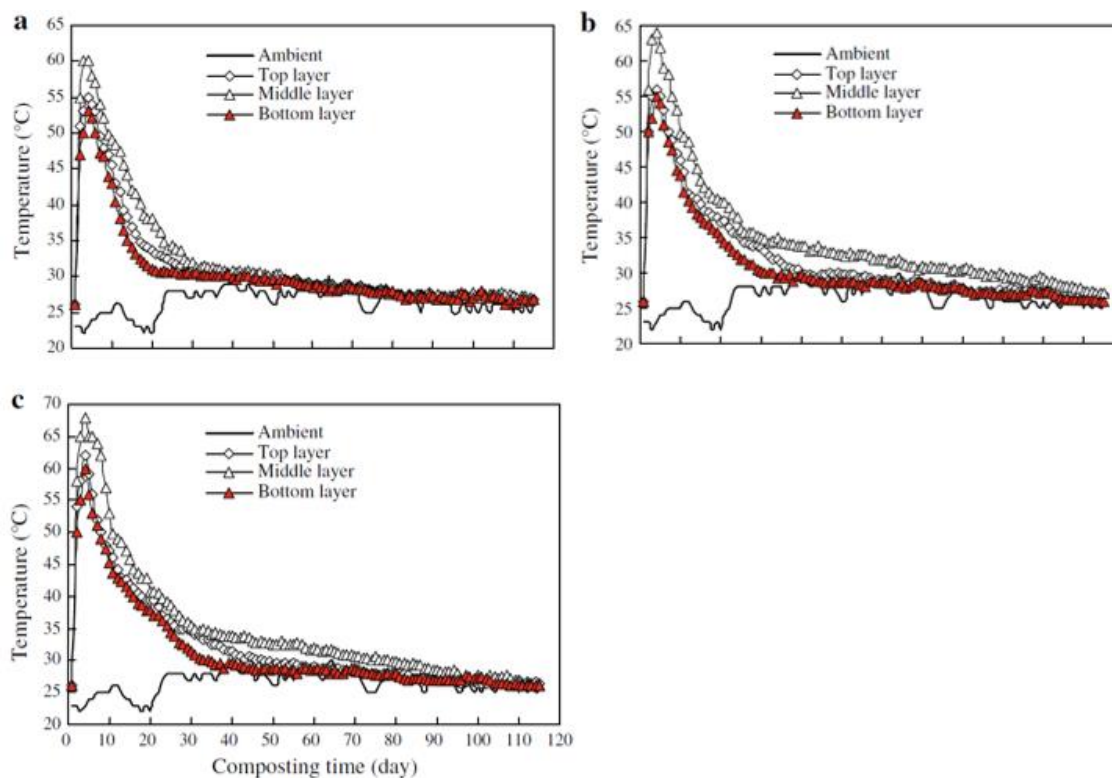
Tres sensores de temperatura fueron montados verticalmente a 0.3 m, 0.55 m y 0.8 m por encima del PVC. Las lecturas de temperatura fueron recogidas con un sistema de control computarizado. El período de la fase termofílica eran 7, 8 y 9 días para las mezclas con relación C/N inicial de 12, 18 y 28, respectivamente. Para evitar la pérdida de humedad, cada montón de compostaje fue cubierto con una capa de 5 cm de compost maduro. Las etapas de maduración se iniciaron el día 18, 21 y 23 respectivamente para cada pila.

Como resultados, la mezcla de compostaje con relación C/N inicial de 28 mantuvo la temperatura inferior o igual a 55 °C durante más de 3 días, pero las mezclas de compostaje con relaciones iniciales de C/N de 12 y 18 no cumplieron con el requisito de la destrucción de patógenos, es decir no presentaron temperaturas mayores a 55 °C.

La conductividad eléctrica final en las tres mezclas de compostaje no supera el valor límite superior de 3000  $\mu\text{S cm}^{-1}$  para compost estables. Sólo la mezcla de compostaje final con una relación C/N inicial de 28, no superó el valor límite inferior de 400  $\text{kg mg}^{-1}$  para ser considerada una composta estable. El  $\text{NO}_3$  contenido en las tres mezclas de compostaje aumentó con el tiempo de compostaje, y un aumento más pronunciado se encontró en la mezcla de compostaje con una relación inicial C/N de 28. El índice de germinación final en mezcla de compostaje inicial C/N de 28 fue del 94 %; Sin embargo, los índices de germinación en las mezclas de proporción inicial C/N de 12 y 18 nunca fueron más del 80 %.

La temperatura de la capa media fue siempre la más alta en cada mezcla de compostaje, y la temperatura en la parte inferior fue la más baja debido al efecto de enfriamiento por evaporación del aire que entra. En un principio, debido a la rápida descomposición de la MO disponible y compuestos nitrogenados por las actividades microbianas, la temperatura de las tres mezclas de compostaje aumentó rápidamente a 47- 50 °C en el primer día, y alcanzó su valor máximo de 60, 64 y 68 °C respectivamente para las tres pilas.

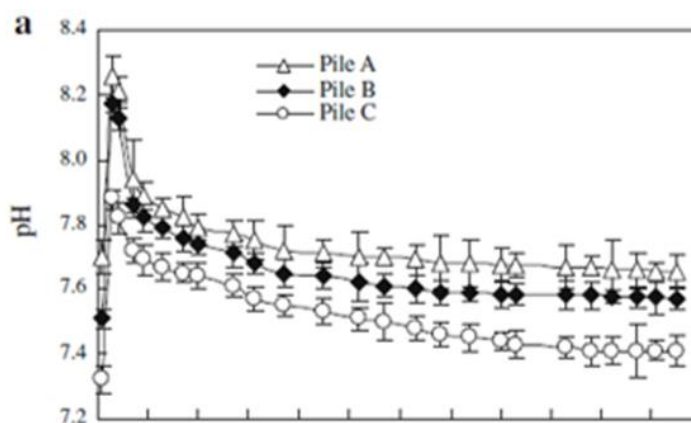
La siguiente figura muestra el cambio de temperatura en las tres mezclas de compostaje en diferentes capas durante el proceso de compostaje.



**Figura 18-1** Gráficas Temperatura vs Tiempo para las tres mezclas de compostaje

**Fuente:** (Evaluation of stability and maturity during forced-aeration composting of chicken manure and sawdust at different C/N ratios, 2010)

Los cambios de pH en el compostaje de estiércol de pollo y aserrín a diferentes relaciones iniciales de C/N se muestran en la siguiente figura.



**Figura 19-1** Variaciones de pH a lo largo del proceso de compostaje.

**Fuente:** (Evaluation of stability and maturity during forced-aeration composting of chicken manure and sawdust at different C/N ratios, 2010)

Como resultado de la liberación de amoníaco y la mineralización de materia orgánica de nitrógeno durante la fase inicial de compostaje, los valores de pH de las mezclas se incrementaron desde un pH inicial de 7.7, 7.5 y 7.3 al máximo pH de 8.3, 8.2 y 7.9 en el día 3, respectivamente. Después de eso, el pH disminuye gradualmente y se estabiliza en valores alcalinos para las tres mezclas de compostaje.

La conductividad eléctrica refleja el grado de salinidad en el producto de compostaje, que indica su posible efecto fitotóxico/Fito inhibidor (A negative-pressure aeration system for composting food wastes., 2008). La figura b muestra un patrón similar de cambio en la CE para las tres mezclas de compostaje. La CE para mezclas de compostaje de Relación inicial C/N de 12, 18 y 28 aumentaron de la inicial 3018, 2840 y 2360  $\mu\text{S cm}^{-1}$  al máximo 6380, 5612 y 5231  $\mu\text{S cm}^{-1}$  en el cuarto día, respectivamente, seguido por una disminución gradual hasta el final del proceso de compostaje. Después de 115 días de compostaje, el contenido de la CE de la mezcla de compostaje con una inicial relación C/N de 12, 18 y 28 fueron 2610, 2380 y 2050  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , respectivamente, lo que hizo que no superara el valor límite de 3000  $\mu\text{S cm}^{-1}$  sugerida por (Chemical characteristics of Malian and Belgian solid waste composts., 1981) para compost estables.

Con el aumento del tiempo de compostaje, el índice de germinación en mezclas de compostaje de C/N de 28, aumentó al 55 % en el día 13, al 81 % en el día 27, y al 94 % en el día 115.

Según (Evaluating toxicity of immature compost, 1981) un valor de IG de más de 80 % es un indicador de abono libre de fitotóxicos y maduro, sugerencias similares también fueron reportados por (Elimination of phytotoxicity during co-composting of spent pig-manure sawdust litter and pig sludge., 1998) . Sin embargo, Los IG en las mezclas de compostaje de relación inicial C/N de 12 y 18 nunca fueron de más del 80 % durante el compostaje.

Como resultados, la mezcla de compostaje con relación C/N de 28 mantiene su temperatura superior a 55 °C durante más de 3 días, pero las mezclas de compostaje con relaciones C/N iniciales de 12 y 18 no cumplieron con el requisito de destrucción de patógenos.

La estabilidad y la madurez en la mezcla de compostaje con relación inicial C/N de 28 fueron superiores a las de las mezclas de compostaje con relación inicial C/N de 12 y 18.



### ***1.6.3. Eliminación de la toxicidad de los polifenoles de lodos de aguas residuales del molino de oliva mediante su co-compostaje con corteza de sésamo***

Este estudio se realizó en Tunisia, por Salma Hachichaa, Juan Cegarrab, Fatma Sellamia, Ridha Hachichaa, Nouredine Drirac empleó torta de oliva agotada, estiércol de aves de corral y los residuos industriales de la actividad agrícola para el co-compostaje con fines de mejora del suelo.

Los desechos sólidos orgánicos fueron regados con aguas residuales de una industria de confitería, las mismas se caracterizan por un alto contenido de azúcares residuales. Cuatro pilas de compostaje aireadas se montaron para establecer los efectos de los subproductos de la industria de confitería en el proceso de compostaje. Diferentes mezclas de desechos agroindustriales fueron utilizadas. Los parámetros físico-químicos (temperatura, humedad, pH, conductividad eléctrica, carbono total y nitrógeno total) fueron evaluados. La estabilidad del sistema biológico se observó después de 70 días. Los productos finales se caracterizan por su relativamente alto contenido de materia orgánica y baja relación C/N de 14 a 17. La humidificación de las pilas con las aguas residuales parecía haber acelerado el proceso de compostaje en comparación con la pila humedecida con agua. Además, se evidenció que la degradación de la materia orgánica ha mejorado hasta llegar a valores de 55-70 %.

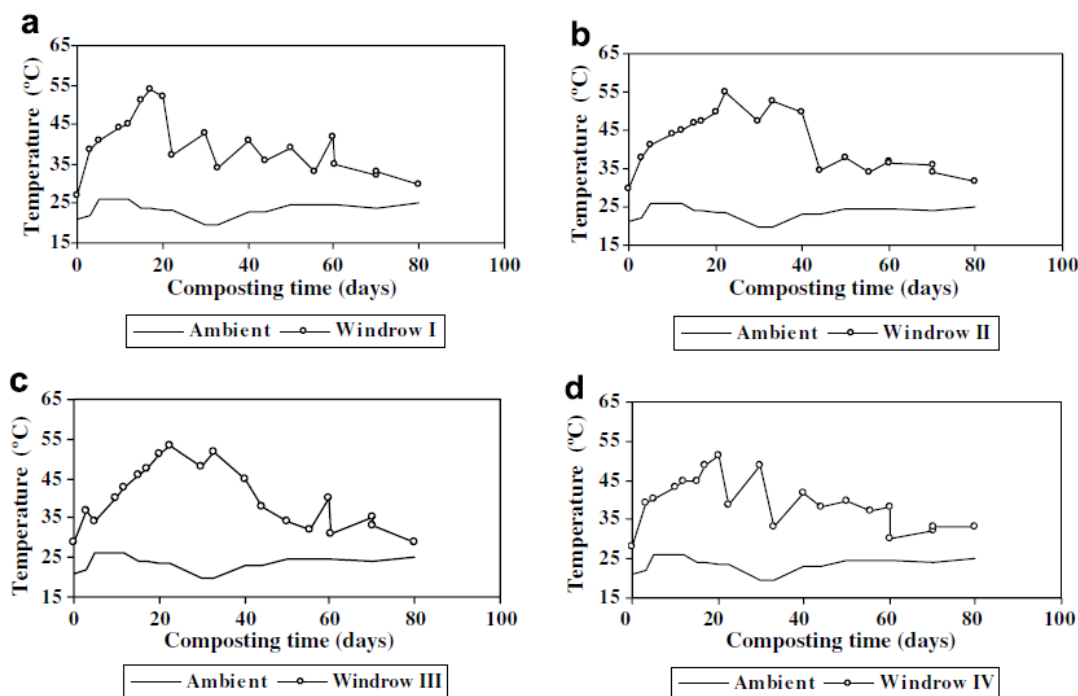
Las cuatro mezclas (de alrededor de 8.000 kg cada una) fueron dispuestas en forma de cono (2 m de altura por 3 m de diámetro de base). Durante el proceso de compostaje (70 días), el contenido de humedad se ajustó a alrededor de 45- 60 %.

Las pilas II, III y IV fueron regadas con aguas residuales de la misma confitería, mientras que la pila I, utilizada como control, fue humedecida con agua.

Las pilas se agitaron mecánicamente para la aireación cuando la temperatura interna (medida por un termómetro de mercurio), superó los 55 °C.

Se llevó a cabo este proceso con una frecuencia de una vez cada tres días a partir del compostaje, a continuación, una vez cada 7-10 días y finalmente una vez al mes. En total, las mezclas se agitaron siete veces durante el proceso. La temperatura de las hileras se midió a diferentes profundidades: 0,25, 0,50 y 0,90 m diariamente.

La evolución de las temperaturas medias en las diferentes pilas durante el compostaje se presenta en la siguiente figura.



**Figura 20-1** Variación de temperatura vs tiempo para las diferentes pilas de compostaje

**Fuente:** (Effects of partial stone removal on the co-composting of olive-oil processing solid residues with poultry manure and the quality of compost, 2003)

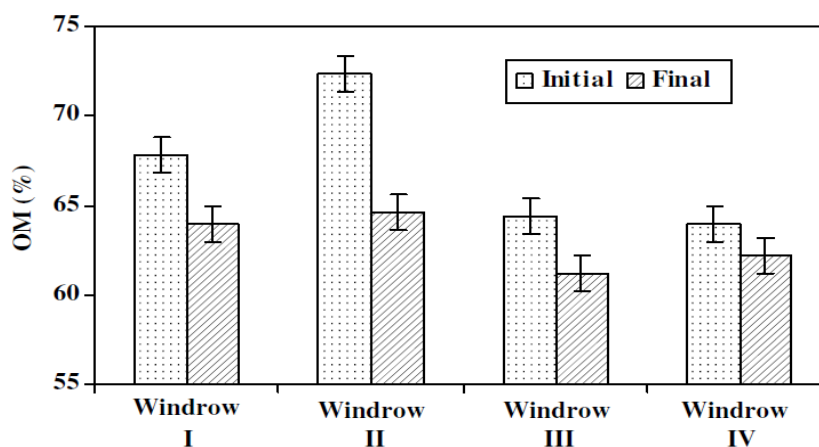
Se observaron tres etapas en todas las pilas. En la primera etapa, un aumento de temperatura desde 30 a 45 °C resultó de la actividad de la flora mesófila, que degrada la materia orgánica y como resultado libera calor, elevando la temperatura a aproximadamente 45 °C dentro de 15 días.

Entonces, comenzó la etapa termófila y la temperatura aumentó rápidamente hasta llegar a cerca de 55 °C. Por lo tanto, se procedió a voltearlas y la aireación producida por el volteo de las pilas y su humidificación causaron disminución de la temperatura, que luego inmediatamente volvió a aumentar a causa de la actividad bio-oxidativa. Esta etapa se caracterizó por una evolución en los picos de temperatura similar a una sierra de navaja, y se mantuvo alrededor de 30 días.

Por último, como la materia más fácilmente biodegradable fue convertida, la actividad microbiana se hizo menos intensa, provocando una disminución de la temperatura. Esto hizo que tienda hacia la temperatura ambiente. En esta etapa, el compost alcanzó el final de la fase bio-oxidativa. La etapa de maduración final requirió varias semanas durante las cuales la disponibilidad del sustrato se restringió y la generación de calor fue baja (Technology and strategy of composting In: Environmental Processes – Wastewater and Waste Treatment., 2000).

Mediante la comparación de las cuatro pilas se demostró además que la adición de cascara de sésamo mejoró la biodegradación y el uso de las aguas residuales para la humidificación mostró mejora de la temperatura de la hilera.

El contenido de materia orgánica inicial y final en las diferentes pilas se presentan a continuación:

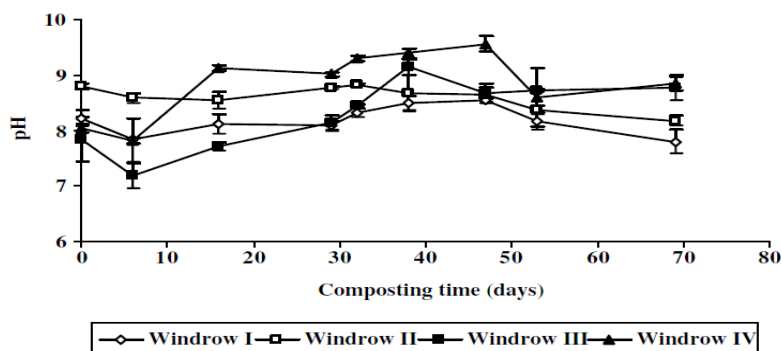


**Figura 21-1** Contenido de materia orgánica inicial y final para cada pila de compostaje

**Fuente:** (Effects of partial stone removal on the co-composting of olive-oil processing solid residues with poultry manure and the quality of compost, 2003)

Todas las pilas muestran contenido orgánico considerable (> 65 %). Sin embargo, la pila II tiene el más alto contenido orgánico atribuido a su composición inicial (torta de oliva agotada: 75 %) y aguas residuales de confitería. En todas las pilas, la materia orgánica fue degradada al final del proceso; La pila II exhibió el mayor porcentaje de degradación (11 %).

La descomposición de la materia orgánica provocó algunas variaciones de pH en todas las pilas.



**Figura 22-1** Evolución del pH para cada pila de compostaje

**Fuente:** (Effects of partial stone removal on the co-composting of olive-oil processing solid residues with poultry manure and the quality of compost, 2003)

De hecho, las cuatro pilas experimentales mostraron tendencias similares de las variaciones del pH durante el proceso de compostaje. Al principio, el pH oscilaba entre valores de 7,5 y 9,0. Entonces, después de la primera semana, el pH se redujo debido a la biodegradación heterogénea del sustrato y a la formación de compuestos tales como grupos carboxílicos y fenólicos, como se demostró anteriormente por (co-composting of barley wastes and solid poultry manure, 2000) y (co-composting of filter cake and bagasse; by-products from a sugar mill., 2005).

Durante las siguientes cinco semanas, cuando tuvo lugar la etapa termófila, los valores de pH se incrementaron con la producción de amoníaco como consecuencia de la degradación de proteínas como fue explicado por (Co-composting of pig manure with leaves., 2001).

La aplicación del compost obtenido al suelo parecía mejorar significativamente su fertilidad. De hecho, los experimentos de campo mostraron un aumento en el rendimiento de la patata; la producción fue de 37,5 toneladas por cada hectárea, en comparación a resultados obtenidos de 30,5 toneladas por cada hectárea con estiércol.

#### 1.6.4. Oportunidades y desafíos de la gestión de residuos orgánicos procedentes del sector agroindustrial en América del Sur: Provincia de Chimborazo (Gavilanes, y otros, 2014)

En este experimento, 27 muestras de diferentes tipos de residuos agroindustriales de origen vegetal, animal y de la industria de procesamiento de alimentos, industria de la madera y la producción de plantas ornamentales fueron caracterizados en base a diversos parámetros, tales como: pH, conductividad eléctrica, aniones solubles en agua, materia orgánica, Corg, Nt, la relación C/N, polifenoles solubles en agua, macro y micronutrientes, elementos potencialmente tóxicos y el IG. Se muestran a continuación datos de características de residuos vegetales.

**Tabla 4-1** Características de los residuos agroindustriales de origen vegetal

<b>Características físico-químicas y químicas de los residuos agroindustriales de origen vegetal</b>							
	pH	CE (dS/m)	MO (%)	Corg (%)	C/N	Polifenoles (g/kg)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/kg)
Media	5.97	3.96	92.0	46.8	29.2	6.83	2612
Rango	3.95- 6.63	1.30-13.43	71.0- 99.6	35.2-53.9	12.2-246.5	1.99-25.75	41-28902

Fuente: (Gavilanes, y otros, 2014)

**Tabla 5-1** Macro y Micronutrientes presentes en residuos agroindustriales de origen vegetal

<b>Macro y micronutrientes y contenidos de sodio en los residuos agroindustriales de origen vegetal</b>										
	Nt (%)	P (g/kg)	K (g/kg)	Ca (g/kg)	Mg (g/kg)	Fe (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Na (mg/kg)
Media	2.59	5.71	12.30	9.06	3.64	792	11	110	71	783
Rango	0.22- 3.69	0.50- 15.87	0.30- 36.87	0.70- 79.13	0.20- 14.80	12- 5576	2-51	4-211	7-154	26- 12732

Fuente: (Gavilanes, y otros, 2014)

**Tabla 6-1** Elementos potencialmente tóxicos de los residuos agroindustriales de origen vegetal

<b>Contenidos de elementos potencialmente tóxicos en los residuos agroindustriales de origen vegetal</b>								
	Ni (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	As (mg/kg)	Se (mg/kg)	Hg (mg/kg)	IG (%)
Media	6.6	7.0	0.10	0.58	0.09	0.35	<0.05	59
Rango	0.4- 40.5	0.4-37.3	0.01-0.41	0.11-3.51	0.10-0.52	0.03-0.67	<0.05	0-125
Valor máximo según EPA	42	300	0.85	8.40	0.75	0.10	0.5	-

Fuente: (Gavilanes, y otros, 2014)

Se analizaron parámetros físico-químicos como el pH, la conductividad eléctrica; parámetros relacionados con la materia orgánica como materia orgánica, carbono orgánico total, carbono orgánico hidrosoluble, relación C/N, polifenoles solubles; macronutrientes: N, P, K, Na y micronutrientes como Fe, Cu, Mn, Zn así como compuestos potencialmente tóxicos: metales pesados (Ni, Cr, Cd, Pb, As, Se y Hg) y también parámetros biológicos como el índice de germinación.

Los resultados mostraron que, en general, los residuos agroindustriales se caracterizaron por un pH ácido, bajos valores de CE y altos contenidos de materia orgánica. Los macro y micronutrientes y las concentraciones de metales pesados fueron más altos en los desechos agroindustriales de origen animal que en los residuos agroindustriales de origen vegetal. La mayor parte de los residuos estudiados mostraron valores de la relación C/N y del IG, que indicaron una falta de estabilidad de la materia orgánica.

Los residuos con los más altos valores de pH fueron los estiércoles de las aves. Además, los valores promedios de conductividad eléctrica (CE) fueron similares en ambos residuos agroindustriales tanto en los de origen vegetal como de origen animal. Los valores de CE fueron significativamente mayores en los residuos hortícolas que en el resto de los residuos agroindustriales de origen vegetal estudiados.

En todos los residuos estudiados, las concentraciones de MO fueron superiores a los límites establecidos para los bioresiduos estabilizados y compost por las directrices europeas ( $MO > 30\%$ ). En general, las relaciones C/N fueron mayores en los residuos agroindustriales de origen vegetal que en aquellos de origen animal, posiblemente debido a los mayores contenidos de N de estos últimos.

Los contenidos promedios de Carbono hidrosoluble fueron más altos en los residuos agroindustriales vegetales que en los residuos agroindustriales animales. Los residuos de plantas hortícolas y los del sector de molinería de quinua tuvieron las concentraciones más altas de Carbono hidrosoluble. La mayoría de los residuos estudiados tenían valores de este parámetro por encima del valor umbral ( $<1,7\%$ ), límite establecido para materiales con un buen grado de estabilidad de la materia orgánica.

En las muestras de residuos agroindustriales de origen vegetal, la concentración media de macronutrientes disminuyó en el siguiente orden:  $K > Ca > P > Mg$  y en el caso de residuos agroindustriales de origen animal, el orden de disminución fue:  $Ca > K > P > Mg$ . En cuanto al contenido en P, el residuo vegetal procedente de la molienda de trigo y los estiércoles de gallinas ponedoras fueron los residuos con los más altos contenidos de P. Los contenidos promedios de K fueron similares en ambos tipos de residuos agroindustriales (12,30 y 15,87 g/kg para residuos agroindustriales vegetales y animales, respectivamente). En la mayoría de los casos, el potasio era el

macronutriente predominante en los residuos agroindustriales de origen vegetal. El calcio fue el macronutriente más importante en los residuos agroindustriales de origen animal, especialmente en el caso de los abonos de las aves ponedoras. Es importante destacar que los residuos agroindustriales de origen animal tenían concentraciones medias más elevadas de macronutrientes en comparación con los de los residuos de origen vegetal, siendo el residuo de serrín el que tenía el contenido de macronutrientes más bajo debido a su carácter ligno-celulósico.

En las muestras de residuos agroindustriales vegetales, la concentración promedio de micronutrientes disminuyó en el siguiente orden:  $Fe > Mn > Zn > Cu$  y en el caso de los residuos agroindustriales de origen animal el orden de disminución fue:  $Fe > Mn \approx Zn > Cu$ . Los niveles medios de micronutrientes fueron más altos en los residuos agroindustriales animales que en los residuos agroindustriales vegetales. En general, los residuos de estiércol de aves de corral tuvieron la mayor concentración de micronutrientes.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede concluir que, en general, los residuos agroindustriales se caracterizaron por poseer bajos valores de pH y CE y altos contenidos de materia orgánica. Los macro y micronutrientes y las concentraciones de metales pesados fueron más altos en los residuos agroindustriales de origen animal que en los de origen vegetal. Sin embargo, todos los residuos estudiados presentaron niveles de elementos potencialmente contaminantes por debajo de los límites establecidos para enmiendas orgánicas en los EE.UU. o directrices de la UE. Por lo tanto, los residuos de las agroindustrias estudiados de Chimborazo (Ecuador) pueden ser utilizados como enmiendas en suelos agrícolas para garantizar tanto su eliminación como para mejorar las propiedades del suelo. Sin embargo, el proceso de estabilización de la MO comenzaría después de la incorporación de estos residuos en los suelos, ya que la mayoría de los residuos estudiados no tenían valores de la relación C/N, Chidro e IG dentro de los límites establecidos para materiales orgánicos maduros. Este hecho hace necesario el uso de tratamientos de acondicionamiento, tales como el compostaje, antes de la utilización de estos residuos para fines agrícolas.

***1.6.5. Compostaje mejorado de heces de aves de corral a través de la suplementación con arqueobacterias oxidantes de amoníaco. (Improved composting of poultry feces via supplementation with ammonia oxidizing archaea , 2012)***

Los arqueobacterias oxidantes de amoníaco (AOA) juegan un papel importante en la oxidación de amoníaco. Sin embargo, no existen datos de procesos de compostaje con participación de AOA. La adición de AOA a la mezcla de abono fue capaz de acelerar tanto el inicio de la fase hipertérmica y el tiempo de compostaje.

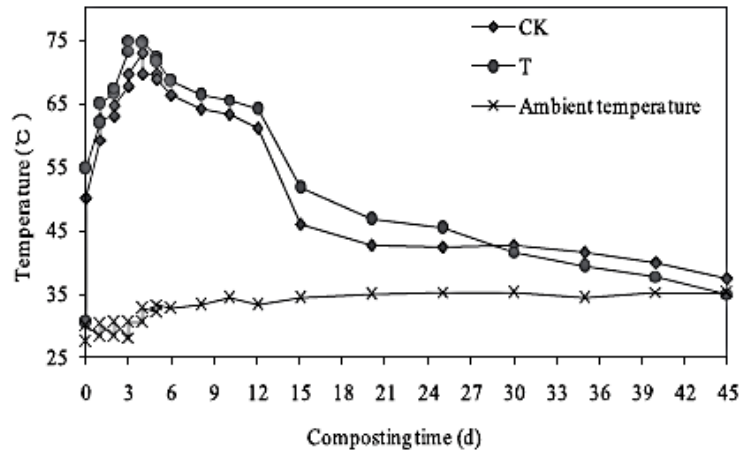
El pH inferior durante la fase de menor temperatura del compost sirve para mejorar el contenido de nitrógeno del compost final. Además, dicha adición resultó en la expansión de la diversidad de las especies de micro flora.

Heces de aves de corral, residuos de hongos, y cáscara de arroz y salvado se mezclaron en proporciones en volumen de 5: 1: 1: 3 y se mantienen con Humedad relativa de 55-60 %. Este experimento se llevó a cabo en la academia de ciencias agrícolas del Instituto de Investigación de Fertilizantes. La ventilación aeróbica forzada del proceso de compostaje se realizó en pilas con una longitud de 60 m, 2 m de ancho y 1,5m de altura. Un ventilador instalado en la base de la cubeta de compostaje, entrega 3.000 L / min continuamente por 17 min cada media hora.

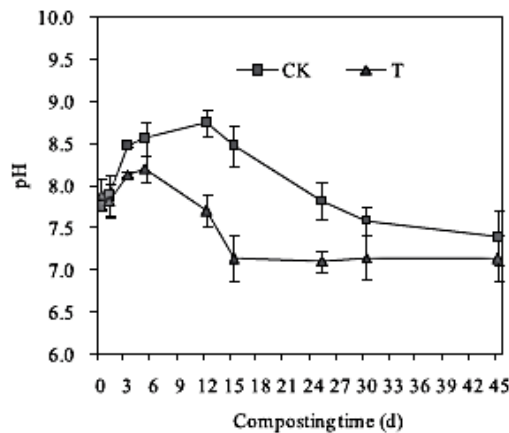
La humedad fue controlada manualmente añadiendo agua antes de cada operación de volteo, es decir cada dos o tres días, y cuando fue necesario.

Después de tres ciclos de cultivo (tres lotes de diez días), la población de AOA en el lodo enriquecido había aumentado de  $7,5 \times 10^4$  a  $1,0 \times 10^9$  UFC / ml, equivalente a un aumento de 13.333 veces. El efecto de la suplementación de AOA en la temperatura de la composta, pH y el carbono a nitrógeno relación (C / N) se muestran en la siguiente figura.

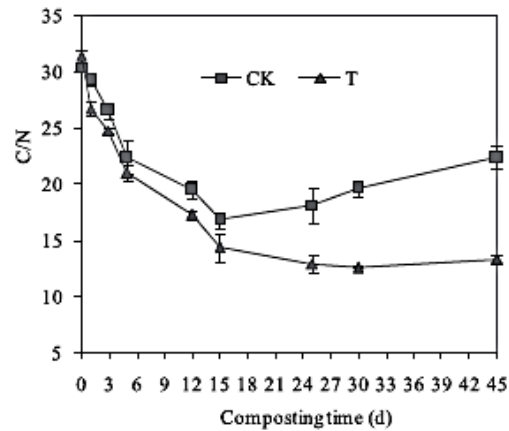




(a) Temperature



(b) pH



(c) C/N

Fig. 2. Changes in (a) temperature, (b) pH and (c) C/N ratio of the compost over the treatment period.

### Figura 23-1 Evolución de la temperatura, pH, y relación C/N del proceso

Fuente: (Improved composting of poultry feces via supplementation with ammonia oxidizing archaea , 2012)

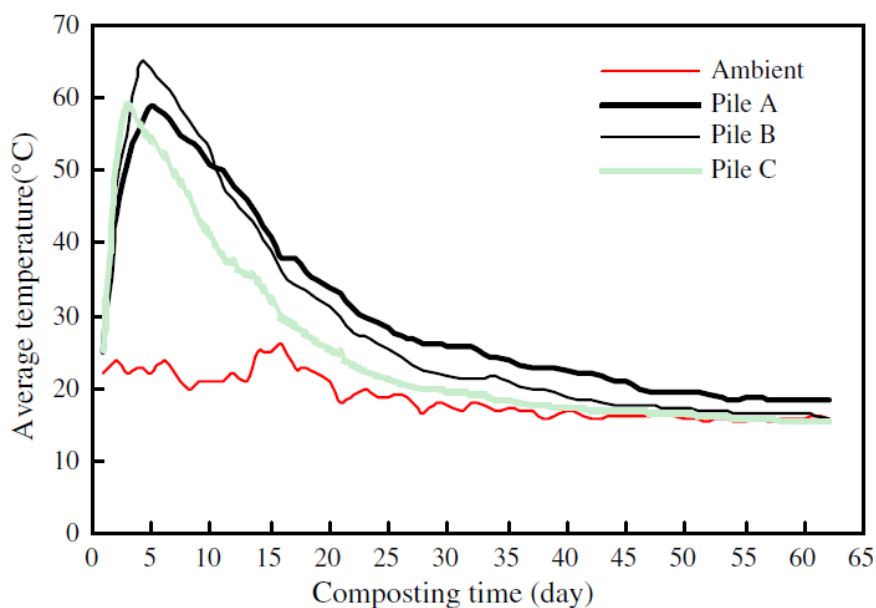
La presencia de AOA acelera la entrada en la fase hipertérmica ( $> 50^{\circ}\text{C}$ ) y también adelanta el momento en que se alcanza la temperatura pico ( $75^{\circ}\text{C}$ ). Típicamente, el compost mantuvo su temperatura pico durante tres días, lo que efectivamente aseguró a los índices de higiene y estado de descomposición del compost. La temperatura aumentó de  $30,3$  a  $61,8^{\circ}\text{C}$  dentro del primer día del período de 45 días de compostaje, permaneció en unos  $60^{\circ}\text{C}$  durante los primeros 12 días, y luego cayó por debajo de los  $50^{\circ}\text{C}$ . La temperatura máxima alcanzada proporcionó así condiciones adecuadas para la proliferación y el crecimiento de AOA. El pH se incrementó lentamente  $7,90$  a  $8,21$  en los primeros cinco días del periodo de compostaje, luego disminuyó a un nivel casi neutro (pH  $7,1$ ) cerca del final del proceso.

El tratamiento también redujo la relación C/N, lo que refleja una tasa de compostaje aumentada y una mayor retención de nitrógeno después de la suplementación de AOA.

Los resultados muestran que la adición de compost de heces de aves de corral con AOA puede reducir el tiempo de compost maduro, y aumentar la retención de nitrógeno.

**1.6.6. El efecto de la tasa de aireación en el compostaje de estiércol de pollo y aserrín con aireación forzada (The effect of aeration rate on forced-aeration composting of chicken manure, 2010)**

El compostaje de estiércol de pollo y serrín se ha investigado mediante un compostaje con aireación forzada. Se establecieron sistemas de aireación de 0.3, 0.5 y 0.7 L min<sup>-1</sup> kg<sup>-1</sup> de materia orgánica (MO), en tres pilas diferentes denominadas pila A, pila B, y la pila C. La temperatura en la pila A y pila B mostró valores superiores a 55 °C por más de tres días consecutivos, pero en la pila C, se mantuvo por encima de 55 °C solo durante dos días.



**Figura 24-1** Evolución del perfil de temperatura

**Fuente:** (The effect of aeration rate on forced-aeration composting of chicken manure, 2010)

El gráfico muestra el perfil de la temperatura media a diferentes velocidades de aireación durante el proceso. Inicialmente, la temperatura en las tres pilas era de aproximadamente 22 °C. Luego de unos días, la temperatura de las tres pilas aumentó rápidamente a la fase termofílica. La fase termofílica duró 9, 8, y 5 días a una tasa de aireación de 0,3, 0,5, y 0,7 L min<sup>-1</sup> kg<sup>-1</sup>. Las pilas A, B y C presentaron temperaturas máximas de 65, 68, y 60 °C respectivamente en el día 4, 3, y 2.

Temperaturas superiores a 55 °C en las pilas A y B se mantuvieron durante más de tres días consecutivos, cumpliendo con la temperatura necesaria para la eliminación de patógenos. Durante la fase de enfriamiento, las actividades microbianas y el ritmo de descomposición se volvieron más lentos, y la temperatura en las tres pilas disminuyó gradualmente. La temperatura en las pilas B y C disminuyó a temperatura ambiente en 62 días, mientras que la temperatura para la pila A se mantuvo por encima de la temperatura. En comparación a la pila A y pila B, la temperatura de compostaje en la pila C no aseguraba seguridad higiénica de los productos de compost.

En la presente investigación se evaluaron la estabilidad y la madurez de productos de compostaje con distintas tasas de aireación. Mediante la comparación de la parámetros físicos y químicos en el producto de compostaje, como NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, N, NO<sub>3</sub>, CE y GI, se determinó que tasas de aireación de 0.5 y 0.7 L min<sup>-1</sup> kg<sup>-1</sup> MO producen compost de mejor calidad que una tasa de 0.3 para aplicaciones agrícolas.

#### ***1.6.7. Comparación entre investigaciones***

Una comparación entre los objetivos, materiales utilizados, configuraciones, parámetros analizados y los principales resultados de las investigaciones se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 7-1 Análisis comparativo entre las diversas investigaciones**

No	TITULO	AUTORES	OBJETIVOS	CONFIGURACION	PRINCIPALES PARAMETROS ANALIZADOS	RESULTADOS
1	Co-Compostaje de residuos de destilería con estiércol de animales: transformaciones de carbono y nitrógeno en la evaluación de la estabilidad del compost	Bustamante, M. Paredes, C. Marhuenda, E. Bernal, M. Moral, R.	Estudiar la viabilidad del reciclaje de residuos sólidos orgánicos. Evaluar la calidad del compost obtenido	1800 kg de residuos Pilas de 2x3x1.5m Ventilación forzada Setpoint 55C Aireación temporizada 30 s cada 30 min	T, pH, CE, MO, C, H <sub>2</sub> O, polifenoles, N, CIC., IG	Ambas pilas alcanzaron temperaturas termófilas. Se mostraron parámetros aceptables en análisis de nutrientes y concentración de metales pesados
2	Evaluación de la estabilidad y madurez durante la aireación forzada de compostaje estiércol de pollo y serrín a diferentes relaciones C / N	Mengchun, G. Fangyuan, L. Liang, A. Bing, Li	Evaluar la estabilidad y madurez de tres diferentes mezclas de compost mediante aireación forzada	3 mezclas de residuos. Reactor 0.8x0.72x1.32m Volumen 600L. Caudal de 180L/min Setpoint 65C Aireación temporizada 5 min cada 10 min	T,pH, Humedad, COT, N, C/N	La pila con relación C/N de 28 cumplió con los requisitos de eliminación de patógenos y presenta más estabilidad y madurez. El pH de las 3 mezclas se estabilizó al concluir el proceso.
3	Eliminación de la toxicidad de los polifenoles de lodos de aguas residuales del molino de oliva mediante su co-compostaje con corteza de sésamo	Hachichaa, S. Cegarrab, J. Fatma, S. Hachichaa, R. Noureddine, D.	Evaluar la toxicidad polifenólica de los productos del compost	4 pilas de compostaje de 8000kg cada una. Dimensiones 600x2x3m. Aireación mediante agitación mecánica Setpoint 55C	T, Humedad, pH, CE, C, polifenoles, N	Todas las pilas degradaron los compuestos tóxicos. Las mezclas se descompusieron adecuadamente dando como producto un compost de alta calidad.

No	TITULO	AUTORES	OBJETIVOS	CONFIGURACION	PRINCIPALES PARAMETROS ANALIZADOS	RESULTADOS
4	Oportunidades y desafíos de la gestión de residuos orgánicos procedentes del sector agroindustrial en América del Sur: Provincia de Chimborazo	Gavilanes, I. Paredes, C. Pérez, A.	Caracterizar residuos agroindustriales de origen vegetal y animal	Desechos vegetales analizados provenientes de residuos de cosecha de la comunidad de Gatazo	pH, CE, MO, C, C/N, Polifenoles, NO <sub>3</sub> , N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn, Zn, Na Ni, Cr, Cd, Pb, As, Se, Hg, IG	Residuos con pH ácido, bajos valores de CE, niveles altos de concentraciones de metales pesados. Se evidencia la necesidad de un tratamiento para eliminar compuestos contaminantes antes de utilizar los residuos con fines agrícolas.
5	Compostaje mejorado de heces de aves de corral a través de la suplementación con arqueos bacterias oxidantes de amoníaco	Kaizhi Xiaoshan, J. Peizhi, Xu Xu, Huang Wenjie, Gu Fabao, Zhang Shaohai, Yang	Mejorar el compostaje mediante suplementación de Arqueos bacterias Oxidantes de Amoníaco	3 Pilas de compost dimensiones 60x2x1.5m Caudal de 3000L/min Aireación Temporizada de 17min cada 30 min Setpoint 60C	T, pH, relación C/N	La adición de AOA redujo el tiempo de maduración del compost y aumenta la retención de nitrógeno Los pHs se estabilizaron al final del proceso. Se evidenció el efecto del control de temperatura usado
6	El efecto de la tasa de aireación en el compostaje de estiércol de pollo y aserrín con aireación forzada	Mengchun, G. Bing, L. An, Yu, Fangyuan, L. Lijuan, Y. Yanxia, S.	Evaluar el efecto de la tasa de aireación en el compostaje con aireación forzada en la estabilidad y madurez del compost.	Tasas de aireación de 0.3, 0.5 y 0.7 L/min.kg Setpoint 65C	NH <sub>4</sub> , N, NO <sub>3</sub> , CE, IG	Tasas de aireación de 0.5 y 0.7 producen compost de mejor calidad que una tasa de 0.3 L/min.kg para aplicaciones agrícolas.

Realizado por: Víctor Valverde 2015

### **1.7. El sistema Rutgers para pilas estáticas ventiladas**

El profesor Melvin Finstein y sus colaboradores de la Universidad de Rutgers (NJ, Estados Unidos) marcaron un hito en materia de tecnología aplicada al compostaje, desarrollando un sistema basado en una nueva estrategia: el control de la temperatura del material según las necesidades del proceso. La condición determinante del sistema es el control de la temperatura interna de la masa de materiales, que impide que sobrepase los 60 °C, con un ventilador actuando como soplador, primero de manera temporizada y cuando la temperatura del material es superior a 60 °C, siendo accionado según demanda.

El control de la temperatura máxima del proceso es importante ya que el ritmo de descomposición de la materia es afectado negativamente cuando la temperatura excede los 60 °C, debido a la inactivación de la población de microorganismos responsables de la descomposición; puede ser controlado mediante un sistema de remoción de calor bajo demanda, y oxigenación de la materia, lo que se logra mediante el control termostático de un ventilador, que en síntesis es la base del sistema Rutgers para compostaje

El sistema además es eficiente porque garantiza la oxigenación de la materia orgánica al suministrar aire ambiente al interior del mismo.

#### ***1.7.1. Características del sistema***

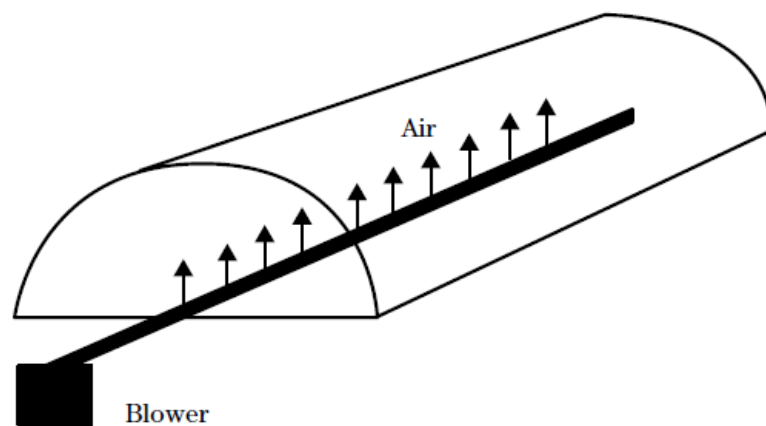
El éxito del sistema radica en que los microorganismos son capaces de realizar una eficiente descomposición de la materia orgánica bajo condiciones óptimas. Es por esta razón que las condiciones de operación tales como temperatura, pH, flujo de gases (por ejemplo, oxígeno, dióxido de carbono, etc.), deben ser cuidadosamente monitoreadas y controladas.

Como se evidencia investigaciones anteriores citadas en esta investigación; los factores determinantes que garantizan condiciones óptimas para el crecimiento y metabolismo de los microorganismos e incrementan la velocidad de descomposición son la temperatura y el contenido de oxígeno de la mezcla de materiales, ya que el ritmo de descomposición disminuye cuando la temperatura excede los 60 °C, debido a la inactivación de la población de microorganismos responsables de la descomposición. Este incremento excesivo, que se da a casi 80 °C, por la naturaleza de la materia

orgánica y sus propiedades de auto-calentamiento, causa un ritmo de descomposición lento. El mismo fenómeno ocurriría si hay ausencia de oxígeno.

Ambas condiciones son plenamente satisfechas con la existencia de aireación de la mezcla de materiales.

Los componentes de este sistema son una fuente de ventilación, provista de un control de la inyección del aire en el sustrato que se inyecta por la parte inferior de la pila de compostaje mediante tuberías que poseen pequeños orificios espaciados a lo largo de las mismas. (Finstein, y otros, 1985).



**Figura 25-1** Esquema del sistema Rutgers para pilas estáticas ventiladas

Fuente: (Haug, 2000)

### ***1.7.2. Importancia de la velocidad de descomposición***

Tanto la aceptación pública como la rentabilidad del proceso dependen del ritmo de descomposición del mismo. Un ritmo alto es consistente con bajo capital y bajos costos de operación. Esto es porque se traduce en la necesidad de menos tiempo de instalación, espacio y dependencias estructurales para lograr un determinado grado de estabilización, menos materiales para manipular, almacenar, y transportar, y en una mejora de la manejabilidad de los desechos. Por esto, el proceso a simple vista se podría clasificar como sencillo y pareciera que no presenta mayor dificultad en cuanto al control y desarrollo del mismo, sin embargo se vuelve necesario identificar los factores que limitan la velocidad o ritmo de descomposición del mismo.

### ***1.7.3. Primer factor limitante: interacción entre la generación de calor y temperatura***

Los objetivos de gestión de los residuos antes mencionados (descomposición de material putrescible, disminución del volumen, peso y contenido de agua, producción de un residuo estabilizado, etc.) pueden lograrse con la generación de calor. Esto es porque la generación de calor es funcionalmente equivalente a la descomposición de los residuos.

En la comprensión de los fenómenos químicos, biológicos, dinámicos y físicos que rigen el sistema de compostaje, la alternativa más útil desde un punto de vista funcional es centrarse en la generación de calor. En particular, el determinante primordial del comportamiento del sistema es una interacción entre la generación de calor y la temperatura.

Consideremos el comportamiento de una pila no controlada de material orgánico que tiene las siguientes características: es lo suficientemente grande para ser auto aislante; el material es húmedo y apoya nutricionalmente al crecimiento microbiano; el material es suficientemente poroso para permitir el intercambio de gases; el intercambio de gases es suficiente para evitar el agotamiento de oxígeno. Con estas características una pila aumenta de forma espontánea en la temperatura porque, por un período de tiempo, la tasa de generación de calor microbiana dentro de la pila supera la tasa de pérdida de calor a los alrededores, este fenómeno de "auto-calentamiento" es la base del proceso de compostaje. Al principio del auto-calentamiento, un bucle de retroalimentación positiva se establece entre la generación de calor microbiana y la temperatura, las temperaturas más elevadas favorecen el crecimiento microbiano con su generación metabólica asociada en forma de calor. Cuando la temperatura empieza a superar aproximadamente 38 °C, la retroalimentación se vuelve negativa, ya que los niveles más altos son progresivamente desfavorable para el crecimiento y la actividad mesofílica. Esto ralentiza la subida de temperatura ya que, en ausencia de los acontecimientos posteriores, se da por terminado en aproximadamente 50 °C (Finstain, y otros, 1985).

Seguidamente, el ascenso de temperatura se renueva, con el inicio del crecimiento termofílico, a partir de aproximadamente 45 °C. Esto restablece la retroalimentación positiva entre la generación de calor y la temperatura. Desde la población termófila en masas orgánicas el auto-calentamiento es más activo a aproximadamente 55 °C, la retroalimentación empieza a ser negativa cuando la temperatura supera este valor. Luego, el ascenso de temperatura disminuye de nuevo, típicamente alcanzando un máximo de 80 °C. A esta temperatura, la generación de calor es leve. Es por esta razón que se distinguen diferentes etapas en el proceso de compostaje, y debido a este fenómeno se debe hacer una diferenciación de las mismas para poder elegir una estrategia que controle el sistema adecuadamente.



La estrategia radica en el plano conceptual, ya que representa un plan para guiar la interacción física, química, eventos biológicos, etc. La implementación de una estrategia es a través de algún conjunto de elementos físicos y mecánicos, incluyendo la geometría de la masa de compostaje, equipos para la ventilación, y maquinaria para la manipulación de materiales. Los elementos de este nivel de organización del proceso se denominan configuración colectiva. La distinción entre la estrategia y la configuración es fundamental para este trabajo de investigación. La configuración a usar será la de pila estática abierta, lo que significa que el material se encuentra al aire libre, ventilado por el soplador, pudiendo o no ser agitado mecánicamente durante el compostaje. (Finstein, y otros, 1985)

#### ***1.7.4. Segundo factor limitante: grado de aerobiosis y porosidad del material***

El término grado de aerobiosis se utiliza para referirse a la parte aeróbica del metabolismo en general durante un proceso de compostaje. Aunque teóricamente los microbios pueden utilizar el oxígeno que está contenido en la materia orgánica que ellos biodegradan, así como el oxígeno gaseoso presente en la matriz de compostaje; los datos de investigaciones sobre la contribución relativa del oxígeno de la materia orgánica en la respiración microbiana parecen no estar disponibles. Además, a diferencia del monitoreo del oxígeno gaseoso para fines de control automático, el monitoreo de oxígeno contenido en el material orgánico no es una opción práctica. Por lo tanto, al no ser factible considerar el papel del oxígeno contenido en la materia orgánica, no se ha usado en las investigaciones, ya que no posee una significancia relativa en el metabolismo de los microbios.

Hasta ahora, la concentración de oxígeno medida directamente en los gases de escape, ha sido ampliamente utilizada como un indicador de la suficiencia de oxígeno y por lo tanto el grado de aerobiosis. Esto puede ser verdadero sólo cuando la concentración de oxígeno influya sobre la fuerza de difusión de los gases. Sin embargo, otros factores, tales como el espesor, tamaño de partícula, temperatura, y velocidad de reacción, son de igual si no de mayor importancia en la determinación el grado de aerobiosis. De hecho, como se indica por (Miller, y otros, 1983), las concentraciones óptimas de oxígeno han encontrado valores que oscilan entre 5 y 20 %. Por Consecuencia, este indicador es de una especificidad y sensibilidad bastante limitada. El cociente respiratorio microbiano (la relación de moles de  $\text{CO}_2$  producidos respecto a  $\text{O}_2$  consumidos en un lapso de tiempo dado) puede ser un indicador más apropiado del grado de aerobiosis, ya que puede diferenciar entre condiciones aeróbicas y anaeróbicas independientemente de los factores en juego (MacGregor, y otros, 1981).

Los principales factores que afectan al grado de aerobiosis son concentración de O<sub>2</sub> intersticial, porosidad del material de compostaje y temperatura. La porosidad influye significativamente en la disponibilidad de oxígeno y la medición de su absorción por los microbios (Coupling a respirometer and a pycnometer, to study the biodegradability of solid organic wastes during compostings, 2007).

La porosidad se determina por el tamaño de partícula, la estructura de las mismas y la disponibilidad de agua (The physical properties of compost, 2003). Diferentes autores sugieren diferentes valores para los requisitos mínimos de porosidad, se ha encontrado que varían de acuerdo a la humedad contenida y a las diferentes mezclas de los coeficientes de la matriz orgánica (Moisture relationships in composting processes, 2002). La porosidad se puede controlar por medio de una mezcla adecuada y el diseño adecuado del sistema para evitar la compresión. La mezcla del material de compostaje ha mostrado un efecto significativo de la porosidad y permeabilidad al aire (Composting of a solid olive-mill by-product (“alperujo”) and the potential of the resulting compost for cultivating pepper under commercial conditions., 2006). Para diferentes tipos de materiales y mezclas que influyen directamente en los patrones de flujo de aire a través de la pila, la temperatura afecta tanto a la tasa de reacción como a las velocidades de difusión de gas.

#### ***1.7.5. Tercer factor limitante: potencial de olor***

La cuota potencial de olor puede definirse como la fuerza de olor que se espera que surja en las proximidades de una planta de compostaje debido a la concentración de ciertos compuestos orgánicos volátiles COVs presentes en los gases de escape de cierto material compostado. Los autores no tienen conocimiento de ningún método plenamente probado que sea capaz de medir el potencial de olor en tiempo real. Se puede afirmar que el grado de aerobiosis puede ser un indicador útil en este contexto, en la medida en que el metabolismo aeróbico parece ser el más importante parámetro operativo, de prevención de olores (Miller, y otros, 1983). Algunos estudios se han centrado en la caracterización de emisiones olorosas durante el compostaje por medio de la tecnología de nariz electrónica (Evaluating the potential of an electronic nose for detecting the onset of anaerobic conditions during composting., 2002).

En vista de la falta de un indicador confirmado de potencial de olor, el seguimiento de olor tiene que únicamente basarse en los parámetros que influyen (Continuous monitoring of odours from a composting plant using electronic noses., 2007). Una parte del metabolismo anaeróbico, velocidad de reacción y de la temperatura también son parámetros que influyen en el posible olor en una

multitud de formas, incluyendo reducción de azufre no biológica, la volatilización de amoníaco, y también el potencial de asimilación de intermedios volátiles por la regulación de la diversidad de la población microbiana (Finsten, y otros, 1993).

#### ***1.7.6. Comparación con un sistema de compostaje similar***

De los diferentes métodos de compostaje existentes, los que se aplican con más eficiencia al tipo de compostaje en pilas con aireación forzada son los de Rutgers y Beltsville.

Estos representan enfoques diferentes para la gestión del compostaje microbiano.

El Proceso Beltsville fue diseñado para el tratamiento de lodos de depuradora y materiales homogéneos, es de uso generalizado. Este proceso es ventajoso por su simplicidad estructural y operativa, debido a la configuración de pila estática. Como la mayoría de sistemas de compostaje, sin embargo, sufre de un fenómeno de descomposición lento como resultado de la alta temperatura que inhibe la actividad microbiana.

Al emplear el sistema Rutgers, sin embargo, la configuración de la pila estática mantiene su operación estructural y simplicidad mientras se ajusta su diseño a la descomposición rápida.

La diferencia en las dos estrategias se origina en el comportamiento inducido del sistema de gestión de la ventilación. La estrategia Rutgers se centra en la eliminación de calor para el control de la temperatura, mientras que el proceso Beltsville se enfoca en el mantenimiento de una condición oxigenada.

Estos objetivos operativos se reconocen a través de los respectivos enfoques adoptados para el control del soplador o ventilador, el tamaño, y el modo de operación. La física, química y biológica que rige el sistema de compostaje, sin embargo, dictan ciertas consecuencias que podrían no ser evidentes de inmediato.

Al centrarse en la temperatura, se proporciona automáticamente una abundancia de oxígeno, mientras que al centrarse en oxígeno las altas temperaturas que se generan provocan inhibición del crecimiento microbiano y por tanto la descomposición de la materia orgánica. Estos principios se refieren a compostaje en general, independientemente del tipo particular de residuos a tratar, la configuración empleada, o el nombre o el estado de propiedad del proceso.

En la siguiente tabla se muestran las diferencias fundamentales entre los dos tipos de estrategias de control.

**Tabla 8-1** Diferencias fundamentales entre el sistema Rutgers y Beltsville

<b>ESTRATEGIA DE CONTROL DEL PROCESO</b>		
<b>SISTEMA</b>	<b>RUTGERS</b>	<b>BELTSVILLE</b>
<b>Objetivo operacional del control de proceso</b>	Mantener una temperatura maxima de 60°C	Mantener una concentración de O <sub>2</sub> entre 5% - 15%
<b>Control del ventilador</b>	Temporizador compuesto con retroalimentacion de temperatura	Temporizador durante todo el ciclo
<b>Dimension del Ventilador</b>	Debe conocerse la demanda para maxima remocion de calor	Prescrito como 0.33 hp por 50 toneladas de material
<b>Modo de Operación del Ventilador</b>	Mediante presion que fuerza la ventilación.	Inducción al Vacío.
<b>Consecuencias del Método empleado</b>	Sistema oxigenado, una elevada generacion de calor y vaporización. La sequedad del material inhibe la actividad a menos que se prevenga; Buen eliminador de patógenos.	Sistema oxigenado, temperaturas altas hasta un nivel que inhibe la descomposicion por parte de las bacterias(80°C). Un ritmo de generacion de calor y vaporizacion bajo; Buen eliminador de patógenos.
<b>Ambas estrategias fueron implementadas en pilas estaticas abiertas.</b>		

**Fuente:** (Finstein, y otros, 1985)

#### ***1.7.7. Componentes básicos del sistema de aireación forzada***

El sistema comprende dos partes principales, el sistema de aireación, y el sistema de control de temperatura, mismos que deben ser construidos con materiales que satisfagan las condiciones necesarias para su operación, es decir resistentes a la corrosión en la entrada de aire o gases, con un panel de control programable para monitorear las variables a controlar.

## **Sistema de aireación**

El sistema de aireación comprende una línea de entrada de aire ambiente, que en la parte interna de la mezcla de materiales cumplirá la función de optimizar la transferencia de calor y nutrientes necesarios para los microorganismos hasta valores óptimos.

Un sistema de aireación por lo general consta de dos partes mecánicas: un elemento de inyección de aire (ventilador), y la tubería por donde es conducido el fluido.

Fuente de Aire: dado que el sistema de aireación no precisa de un flujo de aire con características diferentes al ambiental, el aire se toma directamente de la atmósfera.

Ventilador o soplador: se caracteriza por funcionar como si fuera una bomba centrífuga de succión y desplazamiento de aire, que opera con presión negativa (vacío) en la succión y presión positiva (compresión) en el desplazamiento. Aunque su rango de acción es pequeño en cuanto a las presiones de operación, su capacidad de desplazamiento de aire es muy alta, por lo que puede movilizar grandes volúmenes de aire.

Tubería o línea de aire: Esta debe ser de un material resistente a la corrosión, como acero inoxidable o algún material plástico.

## **Sistema de control de temperatura**

Mantiene estable y dentro de un rango óptimo requerido la temperatura interna del sistema, adecuándolo para el máximo crecimiento desarrollo y metabolismo microbiano.

Un sistema de control de temperatura consta de:

Un sistema de medición de temperatura: sonda que mide la temperatura.

Un controlador de Temperatura: sistema que ordena y controla la posición de encendido o apagado del ventilador que transporta el fluido, en este caso aire ambiente.

Un sistema de conducción de fluido: El aire es un fluido que a bajas presiones se comporta como incompresible, adecuado para la transferencia de calor con el sustrato. Su distribución se realiza mediante tuberías de material plástico.

Temperatura Óptima: La temperatura es un factor que pone en juego la propia supervivencia de los microorganismos. La temperatura afecta a las células y microorganismos involucrados de dos formas distintas:

- Conforme la temperatura se incrementa, aumenta también la velocidad de las reacciones enzimáticas y el crecimiento se acelera;
- Por encima de un punto máximo de temperatura, se produce la desnaturalización de las proteínas celulares y la descomposición de los componentes celulares esenciales para mantener la vida, causando la muerte de las células o microorganismos.

#### ***1.7.8. Tiempo de residencia***

Los tiempos de residencia típicos para este proceso oscilan entre 15 y 28 días, seguidos de una etapa de maduración de entre 30 y 60 días en pilas aireadas. Tanto el suministro de aire como la salida de lixiviados en el sistema se efectúa por la parte inferior de la mezcla de materiales, y la salida de los gases por la parte superior, frecuentemente acompañada por la condensación y recirculación de los mismos (Haug, 1993).

El tiempo de tratamiento dependerá específicamente de las características de composición, dimensión, diseño y control del proceso de compostaje, así como la duración de cada etapa. Por lo tanto se determinara el mismo en la marcha del proceso, sin embargo hay estudios previos sobre diferentes composiciones y formulaciones de compost, que fijan los tiempos totales entre 2-4 meses en su producción.

A pesar de su amplia utilización, persisten determinados problemas en su funcionamiento y se ha planteado que el futuro de esta tecnología depende de dos factores principales:

- Reducir la inversión y los costes de mantenimiento.
- Optimizar el proceso.

Ambos objetivos dependerán de las características del sistema de aireación que se utilice.

Con este punto de partida, el objetivo de esta investigación será el de revisar las publicaciones existentes aplicables a los sistemas de compostaje por aireación, y diseñar un sistema que cumpla con los requerimientos necesarios para la producción del compost con una correspondiente optimización de la distribución de aire en el sistema de una forma automatizada.

### ***1.7.9. Control de la disponibilidad de agua***

La disponibilidad de agua en la mezcla de materiales es un factor muy importante para el ritmo de descomposición de la mezcla de compostaje; puede ser controlada mediante la regulación de la velocidad de flujo de entrada de gas y la temperatura, la duración de eventos de aireación, la velocidad de reacción, la mezcla del material, y la frecuencia de adición de agua.

La tasa de flujo y la temperatura del gas de entrada, junto con la velocidad de reacción (es decir, la velocidad de generación de calor) determinan la tasa de pérdida de agua por medio de enfriamiento por evaporación. El enfriamiento por evaporación puede dar cuenta de hasta el 98 % de la cantidad total de agua extraída (Finstain, y otros, 1985), el resto se atribuye al fenómeno de convección del gas seco.

La eliminación de calor para mantener la temperatura a niveles benéficos para la actividad microbiana conduce a una mayor producción de calor, que a su vez requiere más ventilación, lo que resulta en una mayor eliminación de agua. En consecuencia, la remoción de calor través de la ventilación y la preservación de la disponibilidad de agua son actividades contradictorias. Este hecho ha sido uno de los retos fundamentales en el control de proceso de compostaje debido a la falta de medios alternativos de eliminación de calor eficaz.

En estudios de fermentación en estado sólido, se ha afirmado que la disponibilidad de agua puede, en menor grado, ser controlada mediante el ajuste de la humedad del gas de entrada (Evaluation of two different aeration systems for composting two-phase olive mill wastes, 2006) (Finstain, y otros, 1985) (Solid-state fermentations for biological delignification., 1989). Sin embargo, este tipo de estudios se han realizado en reactores de laboratorio que ofrecen una gran superficie externa en relación al volumen. En consecuencia, contrario a los sistemas de campo, permiten la conservación del agua debido a que la conducción es el mecanismo principal de remoción de calor. La humedad del gas de entrada puede jugar un mayor papel en la conservación del agua sólo en sistemas de relativamente baja densidad energética.

Desafortunadamente, la densidad energética de una mezcla de compostaje es relativamente alta para que un método de este tipo pueda ser utilizado con éxito. En un nivel operacional, la adición de agua es el único medio para contrarrestar la pérdida de agua.

La frecuencia de la adición depende principalmente de las características estructurales del sustrato, la tasa de la pérdida de agua, y la energía liberada en la etapa de procesamiento. Contenidos óptimos

de humedad para mejorar la actividad microbiana cercanos a la máxima capacidad de retención del agua han sido encontrados para diferentes materiales (Thompson, 1984).

Es importante afirmar que la actividad microbiana puede progresar sin importantes reducciones en el contenido de humedad tan bajos como 30 % (Composting based on moderately thermophilic and aerobic conditions for the production of commercial mushroom growing compost, 1983). No obstante, como regla aproximada, un contenido de humedad del 45 %, expresada en base seca puede ser utilizado como un valor umbral para desencadenar un evento de adición de agua (Guide to compost, 1994). Durante un evento de adición de agua, la tasa de adición debe ser mayor que la tasa instantánea de pérdida de agua, y también debe asegurarse de que en el curso, el agua alcance los niveles deseables, tan pronto como sea posible sin causar obstrucción con el agua.

Generalmente, la adición de agua se convierte en un problema, debido a la canalización del agua y a fenómenos de obstrucción. La disponibilidad de agua puede ser mejor controlada en la etapa de la preparación de materias primas. Un material de alimentación puede ser debidamente formulado para contener un contenido energético tal que, la pérdida por evaporación, debido a la cantidad, geometría, distribución y tipo de compuestos biodegradables presente, no cause agotamiento excesivo de agua.

Parece una tarea muy complicada la medida en que el agua tiene que ser eliminado por convección de las zonas con más alta concentración para ser posteriormente transportado y entregado a áreas con una disponibilidad de agua inferior. La ventilación puede facilitar este fenómeno (Finstern, y otros, 1985).

## **1.8. Descripción química del proceso**

Un sistema de compostaje posee variables susceptibles de manipulación y control (temperatura, humedad, y concentración de oxígeno principalmente) con el fin de optimizarlo. Se puede afirmar que una pila de compostaje teóricamente se comporta como un sistema de biorreactor, en el que el residuo va sufriendo un proceso gradual de transformación a medida que aumenta su tiempo de residencia en el mismo.

El sistema de compostaje en pilas con aireación, es un proceso aerobio que provee las condiciones aptas para la vida de los organismos y sus actividades metabólicas. Así, este sistema puede tener amplios beneficios en el proceso y su aplicación merece el estudio (Compost Airflow Resistance, 2002).

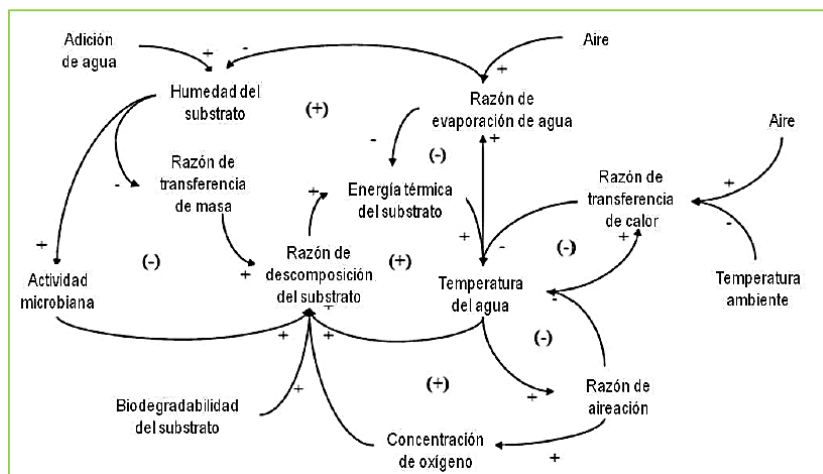


Mantiene un ambiente biológicamente activo, generalmente es un recipiente en el que se lleva a cabo un proceso químico que involucra organismos o sustancias derivadas de dichos organismos, en otros como en el caso de las pilas de compostaje puede ser tan solo una mezcla de materiales en un espacio físico. En términos generales, busca mantener las condiciones ambientales propicias para el organismo o sustancia química que se cultiva.

El sistema, idealmente debe cumplir con las siguientes funciones:

- Mantener las células uniformemente distribuidas en el volumen de cultivo.
- Minimizar los gradientes de concentración de nutrientes.
- Maximizar el rendimiento y la producción.
- Minimizar el gasto y los costos de producción.
- Reducir al máximo el tiempo del proceso.

El sistema de compostaje puede ser tratado como un todo si se dibuja una frontera al exterior del sistema y solo se consideran los intercambios de masa y energía entre él y sus alrededores. Las corrientes de aire transportan masa ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  y vapor de agua) y energía, dentro y fuera del sistema con la cantidad de energía acarreada dependiendo de su humedad y temperatura. La tendencia para el aire es salir del biorreactor con una temperatura y humedad más alta. Un sistema de compostaje se define como un proceso químico en el que se emplea un biorreactor para transformar materia orgánica en un producto final, mediante el intercambio de masa y energía con sus alrededores (sistema abierto), susceptible de aplicar balances de masa y energía en el mismo, y un correspondiente control del proceso para su optimización. Sin embargo, como se aprecia en el siguiente diagrama, es un fenómeno muy complejo. (Application of a dynamic model to the simulation of the composting process., 2007)



**Figura 26-1 Fenómenos que tienen lugar en el proceso de compostaje**

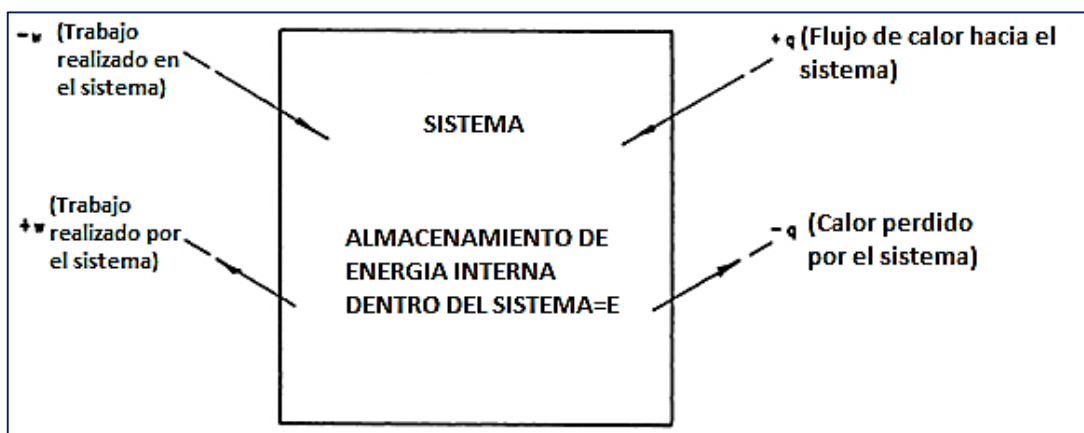
Fuente: (Application of a dynamic model to the simulation of the composting process., 2007)

### 1.8.1. Termodinámica del proceso de compostaje

Desde el punto de vista termodinámico, todos los organismos vivientes pueden ser considerados como máquinas que obedecen las leyes de la energía. La aplicación de los principios termodinámicos es fundamental en el análisis de los sistemas de compostaje debido a que las leyes de la termodinámica son inviolables, la aplicación de dichas leyes revelará mucho sobre las limitaciones y expectativas de los sistemas de compostaje. Por lo tanto un sistema de compostaje es susceptible de análisis termodinámico.

El estudio de diferentes fuentes de energía disponibles para los microorganismos conducirá a un mejor entendimiento de las reacciones que tienen lugar en el proceso, y un aprovechamiento de sus mecanismos para los sistemas de ingeniería.

#### Ley de conservación de la energía



**Figura 27-1** Esquema de la ley de conservación de la energía en un sistema de compostaje

Fuente: (Haug, 1993)

En el esquema, la energía en forma de calor fluye a través del sistema. El calor generado en el interior del sistema puede ser almacenado, fluir fuera del mismo, o aparecer como trabajo realizado por el sistema; es decir debe obligatoriamente transformarse en otra forma de energía. Lo que concuerda con el enunciado de la primera ley de la termodinámica: La energía no se crea ni se destruye, solo se transforma.

Las reacciones químicas que resultan durante el compostaje usualmente producen liberación de calor, misma que puede ser determinada mediante los cambios entálpicos que acompañan a la reacción. (The physical properties of compost, 2003)

En una pila de compostaje, el calor liberado de la descomposición de la materia orgánica incrementa la temperatura de los sólidos, del agua y del aire presentes en la mezcla de compostaje. La energía liberada conduce a la evaporación de agua, realizada por el escape de los gases. Debido a que la pila de compostaje está a una temperatura mayor que sus alrededores, la pérdida de calor ocurrirá desde las superficies expuestas del compost. Por lo tanto se pueden determinar los cambios entálpicos en un sistema de compostaje, pero se deben conocer los componentes de la mezcla, las reacciones que tienen lugar en la misma, las condiciones de operación en cada punto del proceso, valores de entalpia de los gases involucrados, etc. (Haug, 1993).

### **Transferencia simultánea de materia y calor**

A lo largo del proceso de compostaje, tienen lugar fenómenos de transferencia de materia y calor durante la descomposición, los mismos se puede resumir en difusión de vapor de agua entre todas las partículas que conforman el sustrato, transferencia por conducción, transferencia por radiación, y convección del calor desde las zonas más calientes de la pila, hasta las zonas más frías, y los alrededores del sistema.

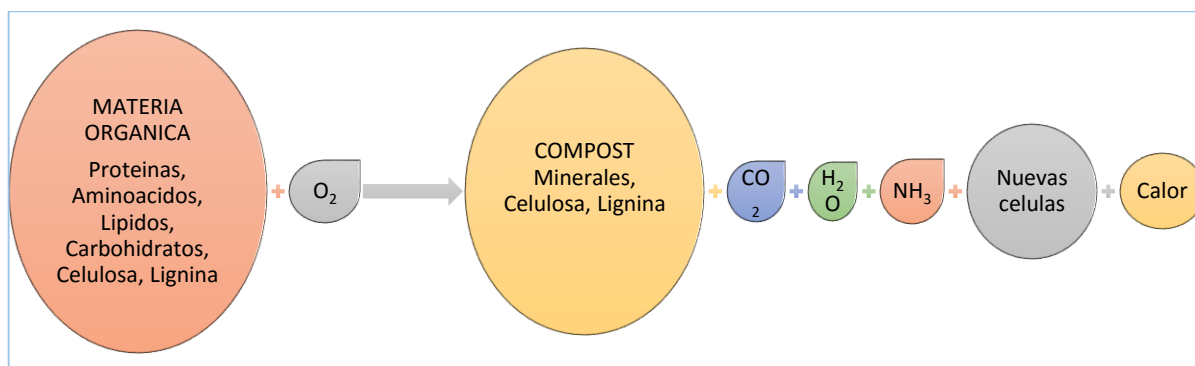
La transferencia de masa se da por migración de vapores a través del sustrato, y también migración del agua entre capa y capa de la mezcla de materiales, a través de espacios intersticiales que permiten el paso de gases y agua simultáneamente, bajo la acción de una corriente de aire que facilita el transporte de los mismos. Además existe intercambio de materia y energía desde y hacia las fronteras del sistema, por todos estos fenómenos, en la práctica se hace imposible la cuantificación de las fracciones másicas de todos los componentes involucrados en el sistema (Haug, 1993).

### ***1.8.2. Balances de materia y energía en sistemas de compostaje***

#### **Transferencia y balances de masa**

La composición del aire inyectado en una pila de compostaje es diferente a la salida y a la entrada. El aire de salida generalmente tiene más CO<sub>2</sub>, menos O<sub>2</sub> y más agua que el de entrada. Por lo tanto en términos de transferencia de masa, el efecto del flujo de aire no es solo proveer O<sub>2</sub> y remover CO<sub>2</sub>, si no también secar la mezcla de materiales.

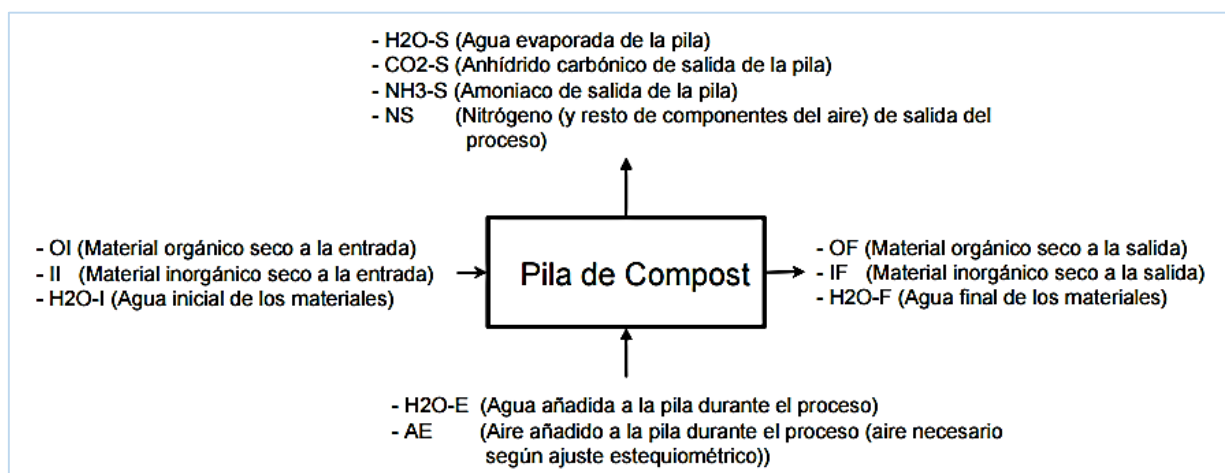
Una reacción general que puede considerarse para este proceso es la siguiente:



**Figura 28-1** Esquema de la reacción general en un proceso de compostaje

**Fuente:** (Thermal balance of invessel composting of tomato plant residues, 2006)

En el siguiente diagrama se presenta un esquema general de todos los componentes que intervendrán en el balance de materia de una pila de compostaje.

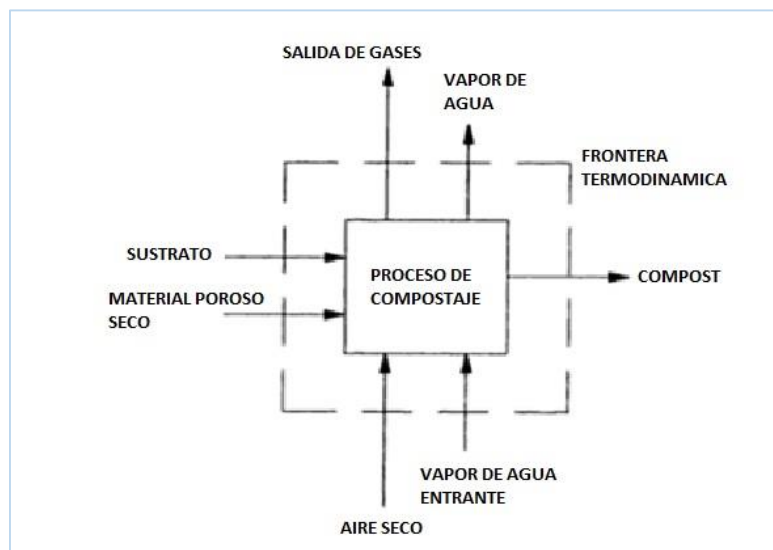


**Figura 29-1** Balance general de materia de una pila de compostaje

**Fuente:** (Haug, 1993)

Como se observa en el diagrama, existen muchas entradas y salidas de materiales tales como materia orgánica, agua, aire y gases producidos en la pila si se considera a la pila de compostaje como un sistema de intercambio de materia y energía, sin embargo, por ser un sistema abierto, son pocos los componentes más representativos y susceptibles de medición o cuantificación. Es decir, en la práctica realizar un balance de materia a un sistema abierto con tal intercambio de materias en diferentes estados, y en el que intervienen reacciones químicas y biológicas, resulta virtualmente imposible.

Por esta razón, es que se muestran sus entradas y salidas más representativas en el siguiente diagrama:



**Figura 30-1** Balance de materia de las fracciones más representativas del proceso de compostaje  
Fuente: (Haug, 1993)

Las entradas más representativas son el sustrato, material de reajuste, aire seco de entrada, y su vapor de agua correspondiente. De igual manera, las salidas del sistema más representativas son el compost producido, el escape de los gases y salida de vapor de agua, dando como producto del proceso el compost.

Aun con esta suposición y delimitación de las fronteras termodinámicas del sistema sigue siendo difícil realizar una cuantificación de los materiales de entrada y salida, debido principalmente a las reacciones químicas que tienen lugar en el interior de la pila y los fenómenos de transferencia de masa y calor que intervienen en la misma.

El sustrato de las pilas es una mezcla heterogénea de materiales; diferentes procesos de transferencia de masa se registran en las fases gaseosa, líquida y sólida del mismo. En la fase gaseosa de los procesos aerobios, el oxígeno debe ser transferido al sitio de actividad microbiana y el dióxido de carbono y otros gases posiblemente inhibitorios deben ser removidos. En las fases acuosas y sólidas, los nutrientes se difunden hasta el microorganismo, las enzimas migran dentro de las partículas sólidas y los productos formados se alejan del sitio de reacción. La humedad también puede ser añadida o removida de la fase acuosa dependiendo de la humedad relativa de la fase gaseosa.

Cualquiera de los siguientes procesos de transferencia de masa puede limitar el cálculo de las fracciones másicas de cada compuesto que interviene en el proceso (Finstern, y otros, 1985):

- a) Difusión de gases hacia y desde las superficies sólidas.
- b) Adsorción y desorción de los reactantes y productos sobre y desde la superficie.
- c) Difusión de los reactantes y productos a lo largo de la superficie de las partículas.
- d) Difusión de los nutrientes y enzimas dentro de las partículas porosas.

Por tales motivos, en la práctica, al fenómeno de aireación de una pila de compostaje, se lo considera como un proceso típico de remoción de calor y transporte de fluidos a través de la mezcla de materiales.

### **Transferencia de calor y balance de energía**

El proceso de compostaje se caracteriza por operar en un intervalo de temperaturas estrecho. La importancia de la temperatura en el desarrollo de un proceso biológico es tal que puede determinar efectos tan importantes como la desnaturalización de proteínas, inhibición enzimática, inducción o inhibición de la producción de un metabolito particular, muerte celular, etc. (Haug, 1993).

El intercambio de energía en forma de calor en una pila de compostaje que incluya aireación forzada, se dará por fenómenos como conducción, radiación y convección entre las fronteras o límites del sistema y los alrededores. La transferencia de calor hacia el exterior de la pared de las pilas ocurrirá por convección forzada debido a que las capas más exteriores de la pila de compost están en contacto con el aire en los alrededores y hay flujo forzado de este aire al pasar a través de las pilas.

$$\text{Acumulación} = [\text{Entrada} - \text{Salida}] + \text{Energ. Rx}$$

$$\frac{d(V\rho V C_v T_{(t)})}{dt} = q\rho C_p T_{i(t)} - q\rho C_p T_{f(t)} + \Delta H$$

$$q\rho C_p T_{i(t)} - q\rho C_p T_{f(t)} + C_p [T_{f(t)} - T_s] = \frac{d(V\rho V C_v T_{(t)})}{dt}$$

## **Balances de calor**

La energía producida durante el proceso de fermentación es responsable de factores como la elevación de la temperatura, la pérdida de agua por evaporación, y la tasa específica de crecimiento microbiano, etc. (A mathematical model for solid state fermentation of mycelial fungi on inert support., 1995).

El éxito del sistema de compostaje depende de maximizar el calor removido mediante vaporización ( $Q_v$ ), ya que este es funcionalmente equivalente a maximizar el ritmo de descomposición de los desechos.

En la práctica, esto solo puede lograrse mediante la manipulación del flujo másico de aire de tal manera que el valor de la entalpía de salida del aire corresponda a una temperatura de 60 °C o menos.

Esta ecuación es la que define un sistema de remoción de calor de la pila mediante aireación forzada, por lo tanto el éxito del mismo depende del diseño de un controlador que maximice la remoción de calor del sistema.

## **Importancia de la remoción de calor mediante convección forzada y su relación con la transferencia de calor**

La tasa global de transferencia de calor puede ser limitada por la tasa de transferencia de calor intra e inter-partícula, por la tasa de transferencia de calor de la superficie de la partícula a la fase gaseosa, o por la tasa a la cual el calor en la fase gaseosa es removido. Las características térmicas del material orgánico y el bajo contenido de humedad en la FMS crean condiciones especialmente difíciles para la transferencia de calor (Heat transfer simulation in solid substrate fermentation, 1990).

La tasa de transferencia de calor mediante conducción en una partícula sólida puede predecirse por partículas de geometría conocida y estructura homogénea, y es afectada por la conductividad térmica y tamaño de la partícula (Effect of air recirculation and reuse on composting of organic solid waste, 2001). La tasa de transferencia de calor de un sólido a la fase gaseosa puede ser aumentada considerablemente a través del flujo forzado de grandes cantidades de gas que atraviesen las partículas sólidas. Lo que no sucede en pilas con aireación natural (Aerobic microbial growth in semisolid matrices: heat and mass transfer limitation., 1976).

Los procesos de FMS se caracterizan por la generación de grandes cantidades de calor. Por ejemplo la producción de 13000 KJ por Kg de materia seca es típica en sistemas de compostaje. La velocidad en la que el calor necesita ser removido depende de la actividad metabólica del microorganismo y de

la cantidad de sustrato en el biorreactor. Desafortunadamente la naturaleza sólida del sustrato y su bajo contenido de humedad conduce a tasas muy bajas de transferencia de calor en FMS. En la FMS estática esta pobre transferencia de calor conduce a un gran incremento en la temperatura del sustrato. En el compostaje no agitado la temperatura en el centro puede alcanzar valores tan altos como 80 °C (Composting, 1985).

## **1.9. Aireación**

### ***1.9.1. Generalidades***

La aireación es el movimiento forzado de aire a través de una masa de materia, con el objetivo de disminuir y uniformar la temperatura, y proveer a la materia de contacto con el aire.

La aireación del compost es el método de control más usado en el desarrollo de la calidad del mismo. Se usa para modificar las condiciones de la masa evitando condiciones que son desfavorables para el crecimiento, desarrollo y metabolismo micro orgánico. El oxígeno que contiene el aire es esencial para el metabolismo y la respiración de los microorganismos aerobios y para oxidar las moléculas orgánicas presentes en los residuos (The science of composting, 1997).

Minimiza olores asociados con procesos anaeróbicos y consume la descomposición de los subproductos degradados parcialmente como ácidos orgánicos, los cuales pueden contribuir a la fitotoxicidad cuando el compost se utiliza finalmente (Composting control: principles and practice, 1996).

Debe mantenerse en niveles adecuados, variando a lo largo del proceso, presentando valores bajos en fase mesófila y alcanzando máximos en la fase termófila (Sztern, y otros, 1999).

### ***1.9.2. Objetivos de la aireación***

La aireación en un sistema de compostaje tiene cuatro objetivos principales: mantener condiciones aerobias, retirar el dióxido de carbono, regular la temperatura del sustrato y regular el nivel de humedad del sustrato (Laboratory scale bioreactor for solid state process., 1988).



El ambiente gaseoso puede afectar significativamente los niveles relativos de biomasa y la producción de enzimas (Controlled gas environments in solid substrate fermentations., 1982). La tasa óptima de aireación en un proceso FMS estará determinada por la naturaleza del microorganismo empleado, los requerimientos particulares de oxígeno para el crecimiento y la síntesis de producto sobre los nutrientes dados, la cantidad de calor metabólico que debe ser disipada, el grado al que el CO<sub>2</sub> y otros metabolitos volátiles son eliminados, el espesor del sustrato y el contenido de humedad (Engineering aspects of solid state fermentation., 1985).

La energía gastada, los daños, gastos y pérdidas provocadas por el movimiento del producto, el espacio extra requerido, modificación de condiciones, y el tiempo necesario para ejecutar la operación, son algunos de los factores que ponen en desventaja al método tradicional en comparación con la aireación. La aireación resuelve significativamente todos estos problemas (Enzyme formation during solid-substrate fermentation in rotating vessels., 1980).

### ***1.9.3. Aireación forzada***

La aireación forzada en sustratos estáticos ha demostrado favorecer los procesos de compostaje aumentando su eficacia y la calidad del producto final (Composting control: principles and practice, 1996). Otros estudios han mostrado que en lechos fijos sin aireación forzada el oxígeno desaparece de las capas interiores del residuo en tiempos extremadamente cortos (The science of composting, 1997).

La falta de oxígeno durante el proceso de compostaje conduce a condiciones anaeróbicas dentro del lecho, que disminuyen la velocidad de degradación y ponen en peligro la calidad final de compost. Es entonces necesario el uso de la aireación forzada en estos sistemas.

La descomposición de la FMS en el compostaje se caracteriza por la generación de grandes cantidades de calor. Este problema se vuelve mayor a gran escala. Las distintas estrategias establecidas para la remoción de calor son las siguientes:

- Aireación forzada con aire húmedo para remover el calor por conducción.
- Aireación forzada con aire seco para remover el calor por evaporación.

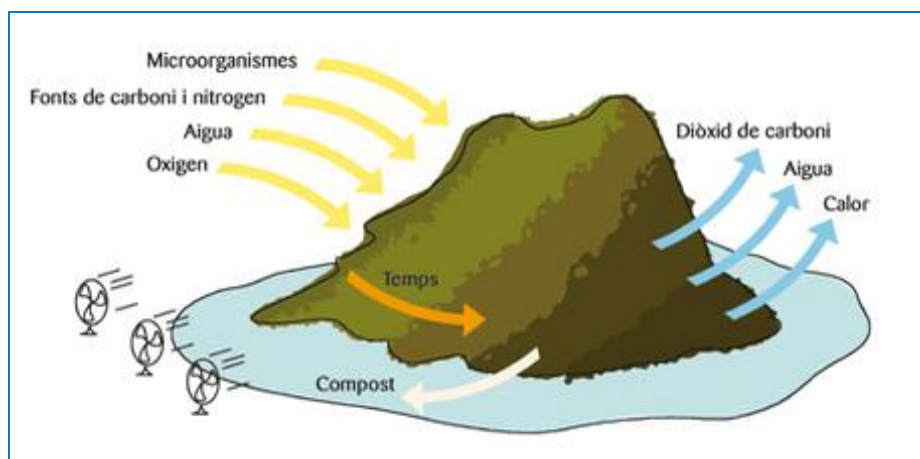
En dependencia de la combinación y configuraciones de los materiales a descomponer, estos métodos pueden resultar más o menos eficientes según sea el caso. Sin embargo en cualquier sistema la

remoción evaporativa de calor es el método más eficiente (The enrichment of cassava by moist-solids fermentation., 1974), la misma puede remover un 80% del calor generado por el crecimiento, sin embargo, el enfriamiento evaporativo debe estar acompañado de un abastecimiento de agua (A method of supplying moisture to the medium in a solid-state culture with forced aeration., 1982).

Empleando aireación forzada se garantiza un medio aeróbico durante todo el proceso. Al hablar de ventilación forzada, se entenderá que el sistema de aireación incluirá una máquina que genere movimiento del aire, por lo general un ventilador centrífugo, mismo que dependerá de las características deseadas por el diseñador del sistema de compostaje.

Un sistema de aireación, en general, está formado por los siguientes elementos.

- Un dispositivo para mover y forzar el paso del aire a través de la materia (ventilador).
- Ductos de alimentación y distribución de aire.



**Figura 31-1** Esquema de un sistema de aireación forzada usado en residuos orgánicos

Fuente: American Bio Tech

#### ***1.9.4. Aireación intermitente y/o controlada***

Existe una tendencia en los estudios publicados sobre los procesos de compostaje con aireación forzada a utilizar sistemas de control del tiempo, temperatura, concentración de oxígeno y otras variables, con el fin de adaptar la ventilación a las circunstancias concretas de la biomasa. Varios autores han utilizado diversas secuencias de tiempo arranque/parada en los ventiladores, aunque sin

distinguir entre las diferentes etapas de compostaje: intervalos de 15 minutos, cada 15 minutos (Experiences at Static Pile Composting Operations Technology Transfer, 1984); 15 minutos por cada hora (Determination of aeration rate and kinetics of composting some agricultural wastes, 2004), etc.

(Composting, 1985) Estudiaron diariamente la concentración de oxígeno durante el proceso de compostaje y observaron que el consumo de oxígeno depende de la actividad microbiana, que es máxima durante los primeros 7 o 10 días del proceso dependiendo del residuo y la técnica utilizada, y disminuye drásticamente después de ese periodo (The science of composting, 1997).

La demanda de oxígeno durante el proceso de compostaje puede variar alrededor del 40-50 % entre la fase de mayor consumo y la fase final de maduración (Effect of air recirculation and reuse on composting of organic solid waste, 2001). Las estrategias de control en sistemas aireados de compostaje son muy variadas. La temperatura y la concentración de oxígeno son las variables más características. Sin embargo también se ha controlado el contenido de humedad. El valor de estos parámetros se aprovecha para controlar el flujo de aireación, bien a través de ventiladores de velocidad regulable o de control de los intervalos de operación de ventiladores con velocidad constante, que permiten optimizar el proceso a través de la remoción de calor.

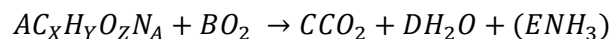
#### ***1.9.5. Necesidades de aireación del material***

El suministro de aire posee tres funciones (Haug, 1993):

- Suministro de oxígeno a los microorganismos encargados de la descomposición aerobia.
- Remoción del exceso de humedad en el material.
- Remoción de calor producto de la descomposición, para controlar la temperatura del proceso.

#### ***1.9.6. Requerimientos de oxígeno por los microorganismos***

Las necesidades de oxígeno de los microorganismos deben satisfacerse para que puedan realizar el metabolismo celular. De no ser así, el proceso se volverá anaerobio y producirá compuestos indeseables. Las necesidades de oxígeno se determinan en base a la siguiente ecuación estequiométrica:



### Ecuación 1

Los valores de A, B, C, D y E se determinan mediante balance químico, los valores de los subíndices x, y, z corresponden a la composición media del sustrato empleado para el compostaje y su población microbiana. Sin embargo, debido a la variabilidad de elementos que integran la mezcla de materiales utilizados, cantidades de los mismos, tipo y cuantía de microorganismos que contiene, sumado al hecho de que es un proceso continuo, se dificulta la determinación de la cantidad de aire requerido (Haug, 1993)

El flujo de aire para cubrir los requerimientos de oxígeno por los microorganismos se determina con la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{C_{A/R}}{t}$$

### Ecuación 2

Donde:

Q es la Cantidad de aire (litros de aire/g de residuo)

t es el Tiempo (día, hora o minutos).

#### **1.9.7. Demanda de aireación para remover la humedad de la mezcla compostada.**

El segundo objetivo de la aireación es eliminar el exceso de humedad existente en el para evitar que el proceso de compostaje se vuelva anaerobio. La determinación de la cantidad de aire a suministrarse para remover el exceso de humedad en el sustrato, se puede estimar considerando los factores ambientales y la cantidad necesaria de agua a remover para alcanzar el contenido de humedad deseado. Para determinar la aireación necesaria para remover el exceso de humedad en la mezcla, se usan las siguientes ecuaciones (Graves, 2000).

1. Primero se determina la cantidad de agua a remover.
2. Deben conocerse la temperatura de entrada y la temperatura salida del aire de la pila de compostaje.

Generalmente se considera que la humedad puede estar en un rango de 40 a 80 %, por ser materiales heterogéneos de composición variable.

Para determinar la humedad que se requiere remover en residuos con humedad superior al 60 %, se emplea la ecuación siguiente (Graves, 2000):

$$m_{arem} = \frac{m_{h1}(H_1 - H_2)}{100 - H_2}$$

**Ecuación 3**

La cantidad necesaria de aire a remover para extraer la humedad se puede estimar mediante el uso de las siguientes ecuaciones (Graves, 2000):

Para calcular la presión de vapor de agua saturado del aire de entrada o salida:

$$\log PVS = \left( \frac{a}{T_a} \right) + b$$

**Ecuación 4**

La presión de vapor de agua puede calcularse por:

$$PV = (HR)PVS$$

**Ecuación 5**

Para esta investigación, se considera que el sustrato a tratar, por las características de los materiales que se sugiere lo integren, poseerá una humedad inicial promedio del 70 %, y una humedad de salida del 99 %, considerada por varios autores como (Haug, 1993) con una temperatura promedio de entrada del aire de 13 °C y de salida de 60 °C. Se considera también una humedad relativa promedio del aire de entrada de 77 %

Usando los resultados de la ecuación anterior, se puede determinar humedades específicas del aire de entrada y salida, empleando la siguiente ecuación (Graves, 2000):

$$W = 0.622 \left( \frac{P_v}{P_t - P_v} \right)$$

**Ecuación 6**

La remoción neta de vapor de agua es la diferencia entre la humedad específica del aire de entrada menos la humedad específica del aire de salida. La cantidad de aire necesaria para remover el agua, se calcula mediante (Graves, 2000):

$$m_{aire} = \frac{\text{masa de agua a remover}(lb)}{W_s - W_e}$$

**Ecuación 7**

Para la determinación del flujo de aire requerido para eliminar el exceso de humedad se usa la siguiente ecuación

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{\frac{m_{aire}}{\rho_{aire}}}{t}$$

**Ecuación 8**

#### ***1.9.8. Demanda de aireación para remover el exceso de calor***

La determinación de la cantidad de calor a remover en el interior de las pilas de compostaje es una tarea muy complicada, por la gran cantidad de variables que involucra. Las limitantes para esta estimación cuantitativa son las siguientes: la descomposición del material es incompleta durante la degradación de los residuos; la oxidación varía en dependencia de la etapa de descomposición en la que se encuentre el material; los residuos, al ser heterogéneos, se vuelve complejo determinar su composición. La determinación del calor generado a lo largo el proceso de compostaje se realiza experimentalmente.

#### ***1.9.9. Suministro uniforme de aire a lo largo de la pila de compostaje***

El éxito del sistema de aireación para compostaje radica en la distribución equitativa del aire a través de los orificios de la tubería. Si los agujeros de las pilas de compostaje están distribuidos uniformemente a través de la sección longitudinal del conducto, la entrega de aire para la pila no es uniforme. Esto es porque más aire sale de la parte del conducto cercana al ventilador, que de la parte distante. Un medio de proporcionar aire de manera uniforme en la dimensión longitudinal es variar el tamaño y/o el espaciamiento de los agujeros de salida de aire a lo largo de la longitud del conducto, de manera que el aporte de aire de ventilación es similar, independientemente de la distancia desde

el ventilador. (Finstein, y otros, 1985). Para determinar esta configuración, la investigación comprenderá el uso de un programa computarizado de simulación de transporte de fluidos para determinar el número de agujeros uniformemente espaciados, y garantizar una distribución uniforme de aire a lo largo de toda la tubería.

## **1.10. Ventiladores**

### ***1.10.1. Generalidades y definición***

Un ventilador es una máquina rotativa, diseñada para mover un fluido de un lugar a otro. Es una máquina que transmite energía al fluido, proporcionando una presión necesaria para mantener así un flujo continuo del mismo, sin variar su densidad.

Un ventilador está constituido por un motor de accionamiento, generalmente eléctrico, cuenta con sus propios dispositivos de control como arranque, regulación de velocidad, control de voltaje y revoluciones, polaridad, etc. y un propulsor giratorio que entra en contacto con el fluido, que transmite energía al mismo. El propulsor posee la forma de un rodete con álabes, en el caso de ventiladores del tipo centrífugo, o de una hélice con palas de silueta, en el caso de los axiales.

### ***1.10.2. Tipos de ventiladores***

Los ventiladores se clasifican según dos criterios fundamentales:

#### **Por la diferencia de presión estática.**

Se refiere al rango de presiones con el que trabajan los ventiladores, su clasificación es la siguiente:

- Ventiladores de Alta presión:  $180 < \Delta p < 300$  mmca.
- Ventiladores de Media presión:  $90 < \Delta p < 180$  mmca.
- Ventiladores de Baja presión:  $\Delta p < 90$  mmca

## Por el modo de trabajo



### Ventiladores Axiales

Poseen un rotor que contiene como máximo trece aspas. El movimiento del aire se da en forma paralela a las aspas.



### Ventiladores Helicoidales

Se emplean para mover aire con poca pérdida de carga, y su aplicación más común es la ventilación general. Sus prestaciones están muy influenciadas por la resistencia al flujo del aire.



### Ventiladores Tubulares

Disponen de una hélice de álabes estrechos de sección constante o con perfil aerodinámico (ala portante) montado en una carcasa cilíndrica. Generalmente no disponen de ningún mecanismo para enderezar el flujo de aire.



### Ventiladores Centrífugos

Son aparatos compuesto de un rodete de aletas que genera que la corriente de aire cambie su orientación desde el lugar donde ingresó, hasta la salida en un ángulo de noventa grados.

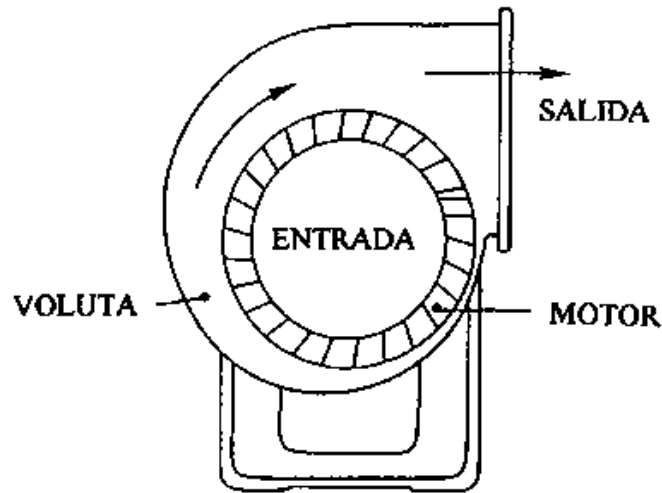
**Figura 32-1** Clasificación de ventiladores según el modo de trabajo

Realizado por: Víctor Hugo Valverde Orozco

### 1.10.3. Ventilador centrífugo o venterol

Es un dispositivo mecánico diseñado para desplazar aire o gas de un lugar a otro. Para tal fin forma una corriente de aire mediante el movimiento de sus álabes. Su uso principal es el de aplicaciones industriales como enfriamiento, calefacción y ventilación o para incrementar el flujo de aire en un espacio. Es una turbo máquina que proporciona al gas un incremento de presión no mayor de 1000 mm H<sub>2</sub>O aproximadamente.





**Figura 33-1** Esquema general de un ventilador centrífugo

Fuente: (Mott, 2006)

#### **1.10.4. Aplicaciones**

Sus aplicaciones son muy variadas, se usa en el campo de la minería, transporte neumático de materiales, con fines de climatización del aire, etc. Principalmente en actividades de transporte de fluidos gaseosos, pero también como medio de transporte de materiales sólidos como cenizas, polvos, etc., y también para remover o proveer calor, humedad, etc.

#### **1.10.5. Ecuaciones de ventiladores centrífugos**

Las siguientes ecuaciones describen el funcionamiento de los ventiladores centrífugos:

##### **Caudal de aire**

Se define como el volumen de gas impulsado por unidad de tiempo y se mide habitualmente en m<sup>3</sup>/h. El caudal que circula por un conducto y la velocidad de circulación están ligadas por la expresión:

$$Q = V * A$$

**Ecuación 9**

### **Velocidad de salida**

Expresa la distancia que recorre el fluido por unidad de tiempo. Su ecuación tiene la siguiente forma:

$$V = \frac{Q}{A}$$

**Ecuación 10**

#### ***1.10.6. Selección del Ventilador y tiempo de operación***

Para la selección del ventilador, es necesario conocer los requerimientos de aireación para atravesar el sustrato a través de los espacios o poros formados entre los trozos del material.

En la aireación de pilas por aireación forzada, la correcta distribución del aire por los espacios intersticiales de la mezcla de materiales, se satisface con una correcta selección y preparación de los materiales que componen el sustrato, sin embargo recomienda el uso de un dispositivo de aireación de 4" de salida, como la alternativa más adecuada en los sistemas de aireación para pilas estáticas, por razones de vencer la tendencia a la compactación de la materia en contacto con los orificios de salida de aire, y el taponamiento de los mismos (The effect of aeration rate on forced-aeration composting of chicken manure, 2010).

(Hachichaa, 2010) y (Finstain, y otros, 1985) usaron este mismo dispositivo en sus experimentos, y determinaron que el flujo de aire que entrega este dispositivo a la mezcla, y la tasa de aireación del mismo garantizan el desplazamiento de los gases producto de la descomposición, hacia los alrededores de la pila, para que no intervengan en las reacciones de descomposición de las poblaciones microbianas sucesivas.

La capacidad mínima del ventilador se calcula con base a los requerimientos de aireación para extraer el exceso de humedad de los residuos.

Se debe también determinar el tiempo de operación del ventilador, que es el tiempo que debe permanecer encendido para proveer al sustrato la demanda diaria de aireación. Para este cálculo se debe tomar en cuenta que el mismo dependerá de la humedad de la mezcla inicial de materiales (asumida para el cálculo en 70 %), y variará a lo largo de todo el proceso de compostaje, también se considerará que esta cantidad de aire calculada es la necesaria para remover la humedad en la mezcla,

más no la necesaria para extraer el exceso de temperatura que genera la mezcla de materiales durante el proceso.

### **1.11. Transporte de fluidos**

El desplazamiento de fluidos, líquidos o gaseosos, se desarrolla por lo general en sistemas largos y complejos con conducciones rectas, en su mayoría cilíndricas, de diámetros variados, con sus correspondientes accesorios como uniones, codos, curvaturas, válvulas, etc. A través de estos sistemas el fluido fluye espontáneamente, siempre y cuando, su energía total disminuya en la dirección del flujo.

De no ser este el caso es necesario transmitirle energía exteriormente con la ayuda de dispositivos como bombas, en el caso de líquidos, o compresores, ventiladores, en el caso de gases.

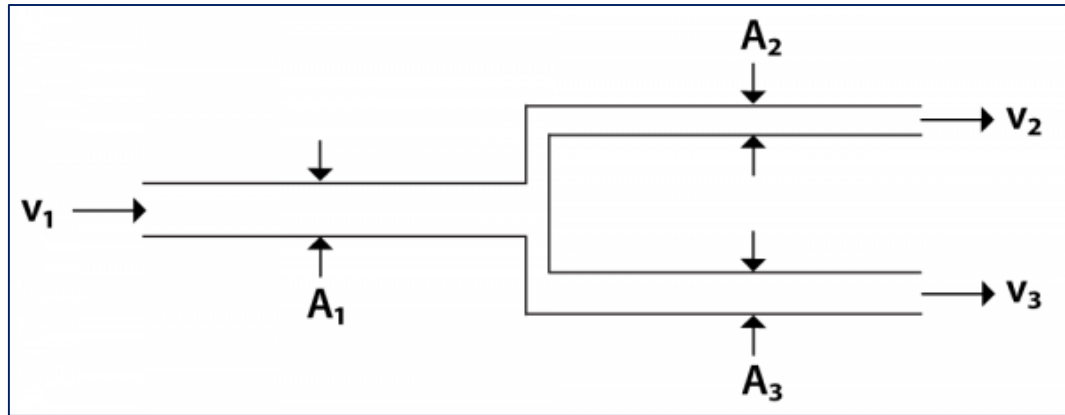
El sistema Rutgers es un sistema que transporta aire, inyectándolo a través de un sistema de tuberías, hasta llegar a la mezcla de materiales a compostar.

La energía a suministrarse al fluido para conseguir que se desplace dependerá del caudal, la altura a que deba elevarse, de la presión requerida al final de su recorrido, de las longitudes y diámetros de los tramos de conducción de la tubería, de los accesorios (ensanchamientos, reducciones, curvaturas, válvulas, codos, etc.) que la conformen y en gran medida de sus propiedades físicas como su densidad y viscosidad.

Para describir el fenómeno del transporte de fluidos, es necesario conocer el tipo de transporte que define el sistema de aireación forzada. El sistema propuesto por el autor de esta investigación se clasifica como un caso típico de conducción de un fluido a través de un sistema de tuberías en paralelo.

#### ***1.11.1. Sistema de tuberías en paralelo***

En un sistema de tuberías en paralelo como el de la figura, existe un fenómeno de bifurcación del flujo del fluido que atraviesa la tubería, pudiendo o no las tuberías siguientes variar el material de la tubería, diámetro y longitud del mismo.



**Figura 34-1** Diagrama de un sistema de tuberías en paralelo

Fuente: (Mott, 2006)

Lo que se busca en este diseño es la distribución uniforme de aire a lo largo de las líneas de tubería en contacto con la pila de compostaje, por lo tanto se establecen características iguales en cada una de las ramas, como igual longitud de tubería para los tramos 1 y 2, y el mismo número y tipo de accesorios usados en cada rama.

Las condiciones que describen el fenómeno de bifurcación son las siguientes (Mott, 2006):

La suma de los caudales de cada rama serán igual al caudal inicial.

$$Q_t = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots$$

**Ecuación 11**

Las pérdidas de energía (o de carga) en cada una de las ramas es la misma, cualquiera sea el ramal que se considere.

$$h_L = h_{L_1} + h_{L_2} + h_{L_3} + \dots$$

**Ecuación 12**

Partiendo de estas ecuaciones y conociendo el flujo de aire a la entrada de la línea de tubería, se pueden determinar caudales y velocidades del aire a través de cada rama de la línea de tubería, y las pérdidas de carga en el sistema.

### 1.11.2. Pérdidas de carga en tuberías

Las pérdidas de carga que experimenta un fluido determinado al recorrer una tubería, se definen como las pérdidas en la presión de un fluido debido a la fricción de las partículas que conforman el fluido, y contra las paredes de la tubería que las conduce. Dichas pérdidas pueden ser continuas, a lo largo de secciones de tubería regulares, o localizadas, debido a circunstancias particulares, como la presencia de un accesorio, un cambio de dirección, etc. Cada accidente o accesorio posee un valor  $k$  o una relación entre su longitud y diámetro  $L/D$  que permite el cálculo de la pérdida que produce en una línea de tubería.

Las pérdidas totales de carga en una tubería comprenden las pérdidas por fricción en la misma, y las pérdidas por accesorios, de esta manera (Mott, 2006):

$$h_L = h_f + h_{acc}$$

**Ecuación 13**

Pérdidas por accesorios:

La ecuación que define las pérdidas por accesorios en líneas de tuberías es la siguiente (Mott, 2006):

$$h_{acc} = \frac{k V^2}{2g}$$

**Ecuación 14**

**Tabla 9-1** Valores del coeficiente  $k$  en pérdidas singulares

VALORES DEL COEFICIENTE K EN PERDIDAS SINGULARES		
Accidente	K	L/D
Válvula esférica totalmente abierta	10	350
Válvula en ángulo recto totalmente abierta	5	175
Válvula de seguridad totalmente abierta	2.5	-
Válvula de mariposa totalmente abierta	-	40
T por salida lateral	1.80	67
Codo a 90° radio corto	0.90	32
Codo a 90° radio grande	0.60	20
Codo a 45° radio corto	0.45	-

**Fuente:** (Haestad Methods, 1998)

### 1.11.3. Ecuación de Darcy

La ecuación de Darcy-Weisbach permite el cálculo de la pérdida de carga debida a la fricción dentro una tubería llena.

Esta expresión permite una evaluación apropiada del efecto que causan los accesorios en la pérdida de energía en una tubería. Esta fórmula puede aplicarse a todos los tipos de flujo hidráulico (laminar, transicional y turbulento):

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g}$$

**Ecuación 15**

### 1.11.4. Factor de fricción de Darcy

El factor de fricción  $f$  es adimensional y varía de acuerdo a los parámetros de la tubería (rugosidad y diámetro) y del tipo de flujo.

**Tabla 10-1** Valores típicos de coeficientes de rugosidad

Material	Coefficiente de Manning	Coefficiente de rugosidad absoluta
Hormigón simple	0,013	0,36
Asbesto cemento	0,011	0,0015
Latón	0,011	0,0015
Hierro fundido	0,012	0,26
Acero corrugado	0,022	45
Acero galvanizado	0,016	0,15
Plomo	0,011	0,0015
Plástico (PVC)	0,009	0,0015
Madera (duelas)	0,012	0,18

**Fuente:** (Crites, y otros, 2000)

**Realizado por:** Víctor Valverde 2015

## **1.12. Control automático de procesos**

En la mayoría de las plantas de proceso existen cientos de variables que deben mantenerse en un valor determinado para garantizar una correcta operación, en este procedimiento de corrección, se vería involucrada una gran cantidad de mano de obra de operarios de la planta, lo que se traduciría en altos costos de operación. Por ello, el objetivo del control automático de procesos es realizar el control de manera automática, es decir, contar con instrumentos que controlen las variables sin necesidad de que intervenga el operador (Smith-Corripio, 1991).

### ***1.12.1. Sistema de control del proceso***

Para realizar un control de cualquier proceso, se debe en primera instancia definir el mismo, sus variables, instrumentos, estrategias de control, etc. Una variable es la cantidad o característica susceptible de medición y de modificación para mantenerla en un valor deseado.

El control del proceso consigue que la variable o variables de proceso se mantengan dentro de ciertos límites o rangos establecidos.

### ***1.12.2. Automatismo***

La automatización de un sistema se basa en el cumplimiento de procedimientos controlados mecánica y electrónicamente, excluyendo en la medida posible la intervención humana en el proceso, con el objetivo de mantener a las variables de proceso dentro de un punto de control, reduciendo errores e incrementando los estándares de calidad. Para cumplir con este objetivo, el sistema de control debe ser capaz de arrancar, regular y detener un proceso, como respuesta a la medición de variables monitoreadas, con la finalidad de obtener la salida deseada. Para esto contará con la utilización de un controlador lógico programable (PLC), que incluya relés, circuitos lógicos y sistemas computacionales. En esta investigación, para el automatismo se analizaron criterios pertinentes para la selección de variables de entrada y de salida del controlador, relacionados con el control automático del proceso de compostaje, basados en investigaciones previas propias de los sistemas de compostaje.

### ***1.12.3. Autorregulación del proceso***

La autorregulación en un proceso, es la característica inherente que posee el mismo de balancear su energía. En el caso del compostaje, la energía que se produce en la masa de materia orgánica, producida por reacciones de descomposición y fenómenos metabólicos, interpretada como un incremento en la temperatura, se autorregula transcurrido un periodo considerable de tiempo, durante el cual mueren poblaciones de microorganismos que realizan la descomposición, por lo tanto se requiere de un control de proceso para garantizar un adecuado desarrollo del proceso de compostaje.

### ***1.12.4. Términos importantes para el control de procesos***

#### **Variable de salida-controlada**

Es la cantidad o condición que se mide y controla para asegurar el desempeño o calidad del producto final. En este caso la temperatura que se genera en el interior de la mezcla de materiales.

#### **Variable manipulada**

Es la variable o condición del proceso que se modifica a fin de influir sobre la variable controlada a través de la dinámica del proceso. Es aquella variable a la que se le hacen los cambios necesarios para mantener la variable controlada en su punto de control. En este caso el flujo de aire que entra a la mezcla de materiales.

Lo que se busca en el control automático del proceso es utilizar a la variable manipulada para mantener a la variable controlada en su punto de control a pesar de las perturbaciones.

#### **Perturbación**

Es una señal que tiende a afectar adversamente el valor de la salida de un sistema. Es una variable de entrada que ocasiona que la variable controlada se desvíe de su punto de control. En el compostaje pueden ser las condiciones ambientales, la humedad del sustrato, etc.



**Punto de control**

Es el valor en el que se desea que permanezca la variable controlada.

***1.12.5. Razones principales para el control de proceso*****Seguridad**

Es necesario que el sistema de ventilación forzada con control automático opere de forma segura tanto para el personal que la opere, para la maquinaria y para las comunidades cercanas y todos los seres que intervienen en el medio.

**Economía**

La operación de este proceso debe ser rentable sobre largos periodos de tiempo, en relación al medio en que se desarrolle. Un proceso está bien diseñado siempre y cuando mantenga continua la calidad del producto, minimizando costos de producción.

**Operación Estable**

El sistema debe facilitar la operación estable de la planta sin oscilación excesiva en las variables de proceso.

**Tasa De Producción**

A fin de ser rentable, debe generar un producto que reúna especificaciones relacionada a la calidad de producto, tiempo de producción minimizado, etc.

***1.12.6. Componentes básicos de un sistema de control***

Todo diseño de un sistema de control tiene los siguientes componentes básicos.

**Sensor**

Es el primer elemento que se encargará de tomar los datos necesarios para controlar el proceso.

### Transmisor

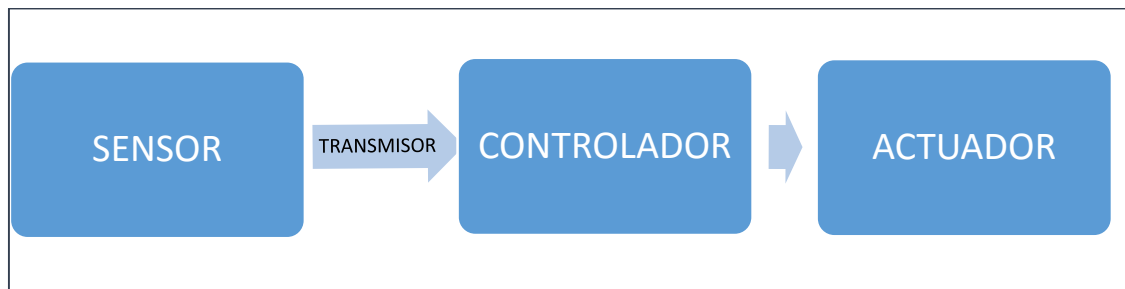
Se conoce como el elemento secundario. Transmite los datos del sensor al controlador.

### Controlador

Este componente analiza los datos obtenidos por el sensor y los compara con valores establecidos previamente, permitiendo tomar decisiones.

### Actuador o Elemento Final De Control

Es el elemento que ejecuta las órdenes del controlador para completar el proceso de control.



**Figura 35-1** Elementos básicos de un sistema de control

**Fuente:** (Smith-Corripio, 1991)

**Realizado por:** Víctor Valverde 2015

Estos componentes realizan tres operaciones básicas que son:

- 1) **Medición (M).** La medición de la variable a controlar se hace generalmente mediante la comunicación del sensor y transmisor.
- 2) **Decisión (D).** El controlador decide que hacer para mantener la variable en el valor deseado.
- 3) **Acción (A).** Como resultado de la decisión del controlador, se debe efectuar una acción en el sistema, realizada por el elemento final de control.

#### ***1.12.7. Funciones de transferencia***

Un fundamento importante y necesario para el estudio de la dinámica y control automático del proceso es la función de transferencia. Es recomendable por tanto considerar sus propiedades y características.

La función de transferencia es la relación de la transformada de Laplace de la variable de salida sobre la transformada de Laplace de la variable de entrada. Generalmente se representa con la letra G.

La función de transferencia define completamente las características de estado estacionario y dinámico, es decir, la respuesta total de un sistema que se describe mediante una ecuación diferencial lineal (Smith-Corripio, 1991).

#### ***1.12.8. Diagramas de bloques***

Un diagrama de bloques es una representación gráfica de las funciones de transferencia por medio de diagramas de bloques sucesivos que representa la interacción de todos los dispositivos que conforman un sistema de control. Se considera una herramienta muy útil en el control de procesos.

En general, los diagramas de bloques constan de cuatro elementos básicos: flechas, puntos de sumatoria, puntos de derivación y bloques

#### ***1.12.9. Controladores lógicos programables (PLC)***

Los controladores lógicos programables son sistemas que poseen dispositivos electrónicos o micro controladores programables por el usuario, cuya función es controlar maquinarias o procesos, pudiendo aplicarse a procesos lógicos o secuenciales.

Las principales funciones que realiza un PLC, son las siguientes (Smith-Corripio, 1991):

- ✓ Recoger datos de las fuentes de entrada de fuentes digitales y/o analógicas.
- ✓ Tomar decisiones en base a criterios pre-programados.
- ✓ Almacenar datos en la memoria.

- ✓ Realizar cálculos matemáticos.
- ✓ Actuar sobre los dispositivos externos mediante las salidas analógicas y digitales.
- ✓ Comunicarse con otros sistemas externos.

Los PLC se distinguen de otros controladores automáticos, en que pueden ser programados para controlar cualquier tipo de máquina, y además de poder ser programados, son automáticos, es decir son aparatos que comparan las señales emitidas por la máquina controlada y toman decisiones en base a las instrucciones programadas, para mantener estable la operación de dicha máquina.

Actualmente existen diversos circuitos de control programables, para la presente investigación se usó una plataforma de software libre conocida como Arduino.

#### ***1.12.10. Selección de la estructura de control del sistema***

Varias estructuras que incluyen sistemas de control de diferente nivel de complejidad se han establecido en sistemas de compostaje. Estructuras de control avanzadas podrían incluir controles en cascada o adaptativos, entre otros. Sin embargo, estas estructuras más complejas no son utilizadas comúnmente en los procesos de compostaje por razones económicas. Debido a la sencillez, ventajas y resultados de investigaciones, se determina que la estructura de control más adecuada para el control de la temperatura en sistemas de compostaje, es el control por retroalimentación (Finstein, y otros, 1985).

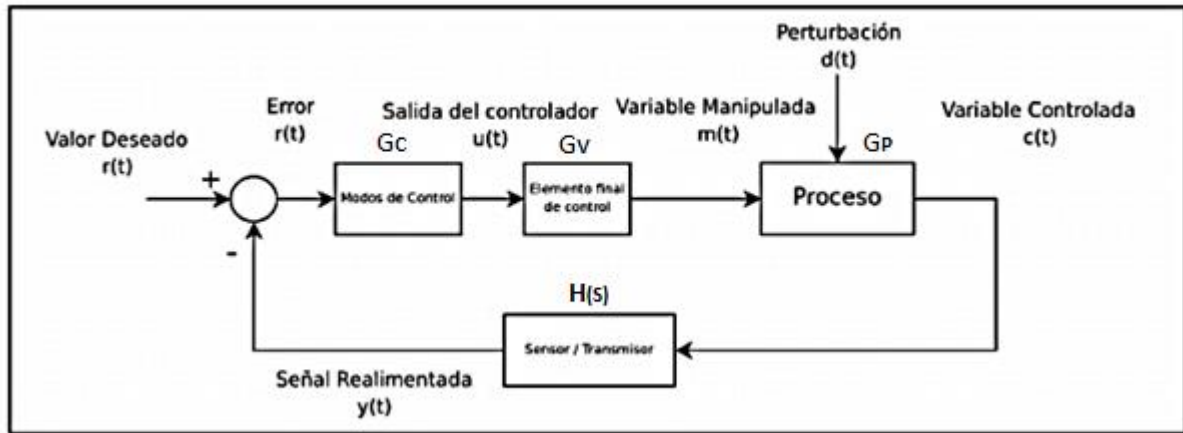
#### ***1.12.11. Control por retroalimentación***

El sistema de control por retroalimentación mantiene una relación determinada entre la salida y la entrada de referencia, las compara y usa la diferencia como medio de control.

El objetivo del control por retroalimentación, que es una operación de ensayo y error, es ajustar los parámetros de control (las variables de salida de proceso) basándose en la información obtenida del proceso, para reducir así el error.

Los sistemas de control realimentados se denominan también sistemas de control en lazo cerrado. En este sistema, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación, con el fin de reducir el error y llevar la salida del sistema

a un valor deseado. Para desarrollar una ley de control, se requiere una descripción cuantitativa de la dinámica del proceso, es decir, la relación entre las variables de entrada del proceso y variables de salida del mismo (Smith-Corripio, 1991)



**Figura 36-1** Diagrama de bloques de sistema de control retroalimentado

Fuente: (Smith-Corripio, 1991)

Donde:

$G_c$  es la función de transferencia del controlador

$G_v$  es la función de transferencia del elemento final de control

$G_p$  es la función de transferencia del proceso.

$H(s)$  es la señal realimentada del sensor/ transmisor

En la figura anterior, se incluye el actuador, el elemento final de control, que es el elemento físico que realiza finalmente el control sobre el proceso y el sensor/transmisor que mide la variable controlada y crea una señal que es transferida al controlador. El componente clave en un sistema de control, incluso cuando está involucrado un bajo grado de automatización, es el controlador. De igual manera que el controlador, las variables de entrada y salida son fundamentales para decidir tanto en el diseño del controlador y la estructura de un sistema de control, la selección de estos parámetros es de suma importancia en el control del proceso de compostaje (Finstein, y otros, 1985).

## **Ventajas y desventajas del control por retroalimentación**

El control por retroalimentación posee la ventaja de compensar todas las perturbaciones. Es decir, cualquier perturbación que afecte a la variable controlada cuando esta se desvía del punto de control, causa que el controlador cambie su salida con el fin de que la variable regrese a su punto de control. El controlador no detecta el tipo de perturbación que entra al proceso, únicamente busca mantener la variable controlada en su punto de control; de esta manera se compensa cualquier perturbación existente (Arántegui, 2010).

La desventaja radica en que únicamente es capaz de compensar la perturbación una vez que la variable controlada se ha desviado de su punto de control, por lo tanto la perturbación se debe propagar por todo el proceso antes de que la pueda compensar el control por retroalimentación, pero dentro del proceso de compostaje, cualquier cambio de variables de proceso referido a perturbaciones no afectará significativamente el desarrollo del proceso, fenómeno que se evita con el control por retroalimentación. Son estas características las que hacen del sistema de control por retroalimentación el más propicio para los sistemas de compostaje. (Evaluation of two different aeration systems for composting two-phase olive mill wastes, 2006).

### ***1.12.12. Selección de variables de entrada y de salida del controlador***

Las variables de entrada pueden ser los parámetros controlados del proceso y / o las principales perturbaciones que afectan el proceso. Estas variables son monitoreadas por el controlador para juzgar el estado pasado, actual o futuro del proceso. Las variables de salida de un controlador son parámetros del proceso susceptibles de manipulación que se refieren a las acciones de control. Los parámetros controlados de un proceso son atributos químicos y físicos, que deben mantenerse dentro de ciertos límites. Los parámetros que pueden ser manipulados expresan cambios cuantitativos y cualitativos en las acciones de control. Un proceso de compostaje debe ser monitoreado y evaluado con respecto a la variable de salida que más influencia tenga con respecto a la velocidad de descomposición de la materia, es decir la temperatura será considerada como la principal variable de salida, misma que presentará un control en su variación mediante la modificación de una variable de entrada, que en este caso es el caudal de aire inyectado en las pilas de compostaje, además esta misma variable de entrada, modifica el contenido de humedad del sustrato y el grado de oxigenación del mismo (Finstein, y otros, 1985).

## CAPITULO II

### 2. PARTE EXPERIMENTAL

#### 2.1. Localización de la investigación

El presente equipo se diseña como un sistema para compostar los desechos orgánicos de los huertos de la parroquia Gatazo, como una aplicación del método Rutgers para compostaje. La investigación aquí reportada es un estudio y diseño en base a bibliografía y características de los desechos a tratar.

##### 2.1.1. Localización geográfica

**País:** Ecuador

**Región:** Sierra

**Provincia:** Chimborazo

**Cantón:** Colta

**Parroquia:** Cajabamba (Villa La Unión)

##### 2.1.2. Macro localización



**Figura 37-2** Localización del Cantón Colta dentro de la Provincia de Chimborazo

Fuente: Foros Ecuador

### Localización de la parroquia Cajabamba (Villa la Unión)

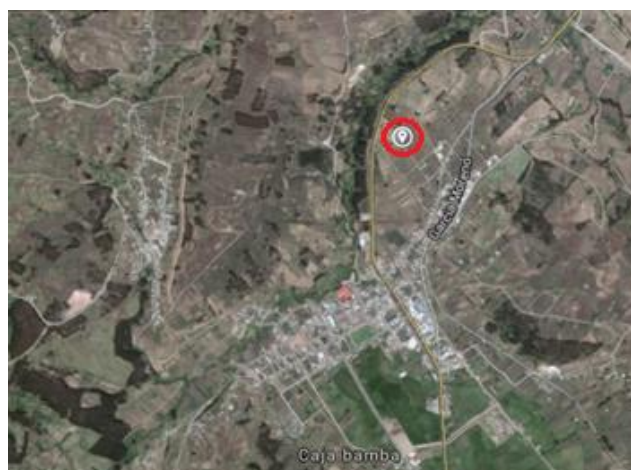
La parroquia de Cajabamba se encuentra ubicada en el cantón Colta perteneciente a la provincia de Chimborazo se sitúa a una altura Se sitúa en una altitud promedio de 3.212 msnm. La temperatura media es de 13 °C. Su proximidad con la ciudad de Riobamba, aproximadamente 18 km, hace de ella una ciudad turística importante (INAMHI, 2011).



**Figura 38-2** Ubicación de la Parroquia Cajabamba (Villa La Unión)

Fuente: Municipio de Colta

### 2.1.3. Micro localización



**Figura 39-2** Ubicación de la comunidad Gatazo

Fuente: Google Maps 2015



#### **2.1.4. Características climatológicas del lugar:**

La temperatura promedio anual en la zona varía de 11 °C a 13 °C, característica de una zona de bosque seco montano bajo de la serranía ecuatoriana; no obstante, existen períodos de estación seca o períodos de verano en los que pueden o no ocurrir heladas, regularmente en los meses de junio, julio, agosto y septiembre; los meses de mayor lluvia son los períodos de octubre- abril y septiembre-noviembre (Municipio de Colta, 2014). La precipitación promedio anual en la zona es de 250 a 100 mm/año. Y la zona cuenta con una humedad relativa promedio de 77 %.

#### **2.1.5. Problemática ambiental actual**

En la zona actualmente la cantidad de desechos agrícolas es elevada, y causa problemas de contaminación, eutrofización, esterilización de suelos, contaminación de las aguas de riego, etc. Estos fenómenos se deben principalmente a la presencia de bacterias patógenas, cantidades excesivas de nutrientes aplicados, y residuos post-cosecha.

Según (INIAP, 2010) , en este sector, se presenta un dato alto de uso de aguas residuales en los cultivos, lo cual podría estar provocando alta contaminación. Otro tema crítico es el uso de agroquímicos prohibidos a nivel nacional e internacional y que según los productores se usan de manera extendida. En los últimos 30 años, se ha duplicado la generación de residuos sólidos en la región, esto ha provocado una tendencia en favor del cultivo y el uso de insumos agrícolas de mayor durabilidad en el ambiente y con una acentuada presencia de sustancias tóxicas, mermando el uso de sustancias orgánicas y biodegradables (PNUMA, 2000) (ILAC, 2004).

#### **2.1.6. Impactos esperados con la implementación del proyecto**

Los residuos agrícolas de la zona, presentan problemas específicos, relacionados con su acondicionamiento previo a su incorporación a los suelos, técnicas de aplicación, dosificación y también el control de los efectos que producen. En el caso del tratamiento de los residuos orgánicos mediante compostaje, se espera una reducción de los problemas asociados al cultivo, así como reducción de sustancias contaminantes y tóxicas presentes en el suelo a largo plazo, además de incrementar la calidad del producto para que así pueda ser implementada como enmienda en los mismos cultivos, esta práctica al degradar los residuos, no genera sustancias contaminantes para el

suelo, y las emisiones de gases no representan problemas mayores de contaminación. Los lixiviados generados en el proceso, se pueden reintegrar a la mezcla de materiales, y aprovecharlos nuevamente. Por estas razones los impactos causados por la integración del proceso a las actividades agrícolas de la zona significa presencia de impactos positivos para la misma, que no genera contaminantes, haciendo del proceso de reciclaje una actividad ecológica.

## **2.2. Métodos y técnicas**

La investigación de las condiciones que rigen el desarrollo del proceso de compostaje, condiciones aptas para el crecimiento y subsistencia de las bacterias biodegradadoras de materia orgánica, y la determinación de las variables necesarias para el diseño y construcción del equipo se realizó en función de los siguientes métodos y técnicas.

### **2.2.1. Métodos**

Para realizar el diseño y construcción del sistema de aireación forzada, los métodos inductivo y deductivo, que fueron de gran utilidad para el análisis de datos y toma de decisiones.

#### **Inductivo**

Conociendo la importancia de conferir un carácter de proceso limpio, ecológico, y de bioremediación a la actividad agrícola, nace la idea de diseñar y construir el sistema de aireación forzada para el control del sistema de compostaje, tomando como referencia investigaciones realizadas sobre la aplicación de métodos de aireación a diversas mezclas de compostaje, como caracterizaciones de productos cultivados en la comunidad de Gatazo, cuyos resultados muestran valores de análisis físicos y químicos de los materiales de partida, así como condiciones y métodos de operación, que sirvieron de base para determinar las condiciones en las cuales el proceso se desarrolla de manera más eficiente.

Mediante las contribuciones bibliográficas, se obtuvieron variables de proceso requeridos en el desarrollo del proceso como: temperatura, concentración de oxígeno, humedad de la mezcla de materiales. Se consideraron también cantidades de materiales a tratar. Estos datos nos sirvieron para realizar el dimensionamiento del equipo.

## Deductivo

Tomando como base estudios realizados sobre el uso de tecnologías de compostaje a nivel experimental, se obtuvieron algunos datos, mismos que aportaron de manera significativa a nuestra investigación.

La investigación y desarrollo contó con fundamentos teóricos de estudio como Transporte de Fluidos, Termodinámica, Transferencia de Masa, y Control de Procesos para realizar el diseño del sistema de aireación forzada.

### 2.2.2. Técnicas

#### Contribuciones bibliográficas

El presente proyecto se realizó basándose en investigaciones citadas en el fundamento teórico de la presente investigación, con las cuales se determinaron las condiciones óptimas, según sus autores, para un adecuado desarrollo del proceso, mismas que nos suministraron datos reales que fueron favorables para el dimensionamiento, diseño y construcción del sistema de aireación forzada.

### 2.2.3. Variables de proceso

Para el diseño y automatización del sistema de aireación forzada, nos guiamos en las condiciones óptimas para el desarrollo del proceso, que fueron establecidas por varios autores, reportan los datos más significativos, las siguientes se consideran variables de proceso de la fase activa del compostaje.

**Tabla 11-2** Variables de proceso de la etapa determinante del compostaje.

VARIABLE	INDICADOR	VALOR	
		INFERIOR	SUPERIOR
Cantidad de materia a descomponer	Kg	1800	2200
Temperatura optima de crecimiento	°C	35	65
Humedad del sustrato	$X = \frac{Kg\ H_2O}{Kg\ solido\ seco} \%$	40	60
Concentración de oxígeno en el sustrato	% O	5	15

Realizado por: Víctor Valverde 2015

### 2.3. Propuesta de diseño

Se obtuvieron datos de investigaciones realizadas por (Finstein, y otros, 1985); (Hachichaa, 2010); (Gavilanes, y otros, 2014). En base a estos, la propuesta para el diseño del sistema de aireación de compostaje considerada por el autor, contará con las siguientes características.

**Tabla 12-2** Propuesta de diseño de la investigación

OBJETIVO	CONFIGURACION	VARIABLES A CONTROLAR	RESULTADOS ESPERADOS
Diseñar un sistema de aireación forzada para el co-compostaje de residuos hortícolas de la comunidad de Gatazo	Pilas de 2000 kg de mezcla de materiales aproximadamente Ventilación forzada bajo demanda Setpoint Programable Aireación temporizada mediante intervalos de tiempo programables	T, Humedad, Concentración de Oxígeno.	Control de la temperatura a lo largo de todas las etapas del proceso. Estabilización de la humedad en la mezcla de materiales. Oxigenación adecuada de la mezcla de materiales

Realizado por: Víctor Valverde 2015

#### 2.3.1. Características de los materiales a compostar

Se trabajará con residuos agroindustriales provenientes de actividades de cosecha propias de la zona, principalmente el brócoli, junto con serrín y estiércol de aves (gallinaza), cuyas características físico químicas determinadas experimentalmente son las siguientes (Gavilanes, y otros, 2014):

**Tabla 13-2** Características físico químicas de residuos de la comunidad de Gatazo

RESIDUO	Brócoli post-cosecha	Serrín	Gallinaza
pH	5.37	3.95	7.56
CE (dS/m)	12.12	7.73	4.52
MO (%)	81.5	9.96	79.2
Corg (%)	44.6	53.9	42.2
C/N	12.2	246.5	15.5
Chidro (%)	18.18	2.73	6.29
Polifenoles (g/kg)	25.39	9.40	9.95
Cl <sup>-</sup> (g/kg)	25.86	0.69	3.66
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (g/kg)	46.65	0.88	4.62
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/kg)	17294	83	82

Fuente: Gavilanes y col. 2014

Realizado por: Víctor Valverde 2015

Dichos materiales en proporciones adecuadas, aportarán una adecuada relación C/N a la mezcla con valores de 25:1 – 30:1. Se muestran tres opciones de proporciones para los materiales que se consideran adecuadas según (Pucha, 2007). Es importante recordar que se deberá añadir una capa de material poroso (como paja) en la parte inferior de las pilas que permita el paso del aire en la parte inferior de la pila de compostaje, para garantizar el correcto funcionamiento del sistema de aireación.

**Tabla 14-2** Composiciones propuestas para la mezcla de materiales

CONFIGURACION	COMPOSICION DE MATERIALES A COMPOSTAR %		
	Estiércol de Aves	Residuos de Hortalizas	Serrín
1	15	75	10
2	20	50	30
3	40	50	10

Fuente: (Pucha, 2007)

Realizado por: Víctor Valverde 2015

### 2.3.2. *Estructura y tamaño de los residuos*

Se debe reducir a los mismos a tamaños entre 1-5cm. Se debe tomar en cuenta que algunos materiales pierden su estructura al ser incorporados a la mezcla, como el caso de los estiércoles, sin embargo otros son muy resistentes a los cambios.

### 2.3.3. *Humedad*

Los residuos de cosecha del brócoli poseen una humedad superior al 90%, pero los demás materiales adicionados en la mezcla poseen diferentes características, es por esto que se considera que la mezcla de materiales posee un valor medio de humedad del 70%.

### 2.3.4. *Lugar e instalaciones*

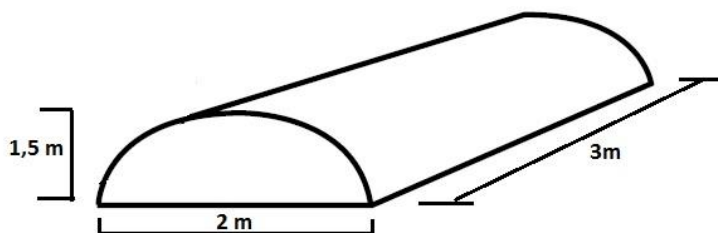
Para la realización de las pilas de compostaje, se contará con un área dedicada para el co- compostaje de los residuos orgánicos. Es necesario que se nivele el terreno donde se colocará la mezcla de materiales para facilitar el escurrimiento de fluidos de las pilas.

Se requiere la construcción de una estructura tipo cubierta con plástico de invernadero, para proteger a la pila de compostaje de la lluvia. Las instalaciones contarán con un área para el volteo del material y disponibilidad de agua para riego de la pila.

### 2.3.5. Configuración de la pila de compostaje

La preparación de la pila se realiza en capas o mezclando los materiales con las proporciones adecuadas de residuos, serrín y estiércol. A medida que se va conformando la pila, se añade agua para que las diferentes capas se adhieran. Para que se produzca la fermentación aerobia es indispensable la presencia de aire y agua. En estas condiciones, y junto con el control de las variables, se asegura la correcta descomposición de la mezcla de materiales. Para esta investigación se considera:

- Dimensiones de la pila: 2m x 3m x 1.5m
- Volumen total de la pila: 9m<sup>3</sup>
- Distribución de la materia: mezcla homogénea



**Figura 40-2** Dimensiones de la pila de compostaje

Realizado por: Víctor Valverde 2015

### 2.3.6. Configuración del sistema de tuberías

Los datos obtenidos para el diseño del sistema de tuberías, se basan principalmente en la investigación realizada por (Finstein, y otros, 1985). La propuesta de esta investigación plantea el uso de un sistema de tuberías de PVC en paralelo con dos líneas de distribución de aire a lo largo de la pila, las mismas tienen un diámetro de 4 pulgadas, con orificios perforados a lo largo de la sección longitudinal para la distribución del aire.

### 2.3.7. Pre-tratamiento y post-tratamiento de los residuos

Es necesario acondicionar los residuos para que la descomposición sea adecuada, esto se logra con un pre-tratamiento de los mismos, que comprenderá las siguientes operaciones:

**Clasificación:** Se realiza una selección de materias orgánicas para la descomposición, a la vez que se excluyen materias ajenas al proceso, para evitar interferencias y reducir la generación de rechazos.

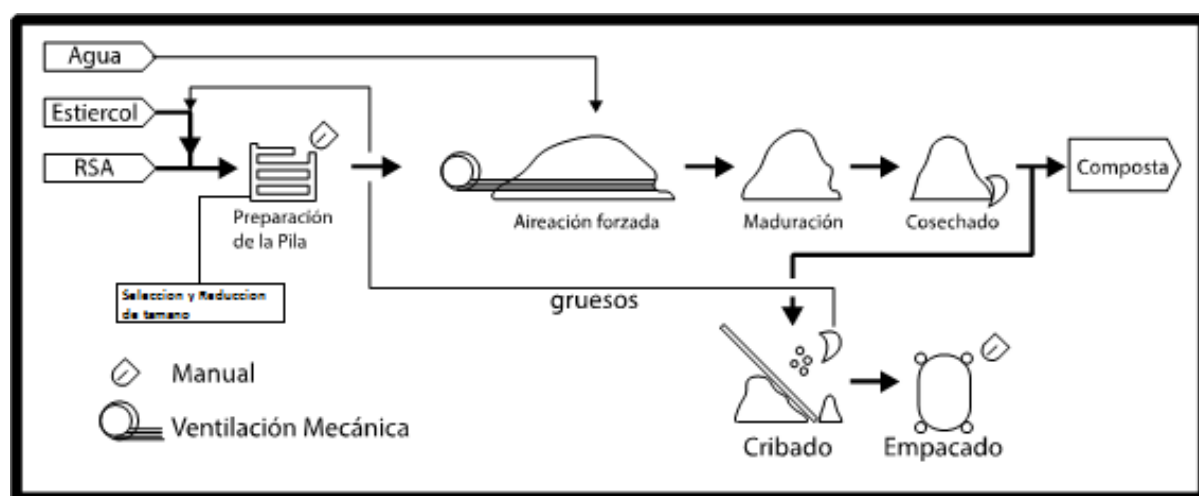
**Disminución del tamaño de partículas:** Se debe reducir las partículas a descomponerse a tamaños adecuados, esta operación se puede realizar manualmente o en forma mecánica con la ayuda de una trituradora.

Dependiendo del destino que se le dé al producto, se realizarán operaciones como el cribado y el empacado del compost producido.

**Cribado:** Consiste en la separación de partículas de diferentes tamaños en dos o más fracciones, se realiza haciendo pasar el producto sobre una superficie provista de orificios de tamaño deseado.

**Empacado:** Se dispone el producto del proceso en sacos para su distribución o aplicación en el terreno.

Un esquema propuesto para el tratamiento de los residuos de la parroquia según el autor de esta investigación, que muestra una planta de compostaje parcialmente mecanizada que integra un sistema de aireación forzada es el siguiente:



**Figura 41-2** Planta de compostaje con aireación forzada

Realizado por: Víctor Valverde 2015

## CAPITULO III

### 3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

#### 3.1. Consideraciones para el diseño

Las siguientes consideraciones se tomaron en cuenta para el diseño:

La capacidad de procesamiento de material será de aproximadamente 2000 kg de residuos

El tiempo de residencia en el sistema de tratamiento dependerá del ritmo de descomposición. Generalmente la fase activa del proceso dura entre 30 y 60 días.

Se considera que los residuos que conformarán la pila de compostaje, antes de integrarse a la mezcla, son fraccionados en tamaños de 1 a 2 cm idealmente, evitando fracciones mayores a los 5 cm.

La mezcla de residuos debe cumplir con las condiciones de relación C/N, pH y humedad establecidas como óptimas.

Las dimensiones del dispositivo permiten ubicarlo en lugares que presenten condiciones climáticas adversas, y las características de sus instalaciones ofrecen resistencia ante factores ambientales.

Se utiliza aireación forzada, ya que permite un mejor control del proceso, controla la emisión de olores y garantiza temperaturas óptimas de operación dependiendo de la fase del proceso.

El sistema está orientado a compostar materiales de origen vegetal, mediante la incorporación de otros materiales a la mezcla y un correcto control de proceso.

**Figura 42-3** Consideraciones de diseño del sistema propuesto

Realizado por: Víctor Valverde 2015



### 3.2. Definición de las funciones del sistema

**Tabla 15-3** Características y funciones específicas del sistema propuesto

PUNTOS CONSIDERADOS	CONSIDERACIONES DEFINIDAS PARA EL DISEÑO
CARACTERÍSTICAS DE LA MATERIA PRIMA A PROCESAR	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Residuos hortícolas provenientes del cultivo.</li><li>▪ Material fraccionado en tamaños de 1 a 5 cm.</li><li>▪ Mezcla con humedad inferior a 80% (70%).</li><li>▪ Mezcla con un pH entre 6 y 8.5.</li><li>▪ Mezcla con relación C/N de 20:1-30:1</li></ul>
FUNCIONES DEL SISTEMA DURANTE EL PROCESO DE COMPOSTAJE	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Proporcionar un medio que permita la descomposición de los materiales.</li><li>▪ Disminuir el tiempo de compostaje.</li><li>▪ Aireación de la mezcla de materiales.</li><li>▪ Enfriamiento de la mezcla cuando la temperatura es mayor a la programada.</li></ul>
SALIDA DEL MATERIAL	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Composta biológicamente estable</li><li>▪ Libre de patógenos y metales pesados.</li></ul>

Realizado por: Víctor Valverde 2015

#### 3.2.1. Descripción del sistema seleccionado

El sistema seleccionado presenta las siguientes particularidades:

La capacidad de tratamiento del sistema de compostaje permite el tratamiento prolongado de los materiales a compostar.

El sistema electrónico y de control permite mantener la temperatura en el interior de las pilas de compostaje por debajo de una temperatura programada, extraer el exceso de humedad de los residuos, y suministrar los requerimientos de oxígeno para el desarrollo de los microorganismos. El funcionamiento adecuado del sistema de distribución de aire es fundamental para el sistema, con tal fin fue necesario diseñar un sistema de tuberías que garantice el ingreso de aire desde la parte inferior de la pila de compostaje y se distribuya por toda la mezcla de materiales.

Para ello, el sistema de tuberías que se utilizó para distribuir el aire es un sistema de tuberías en paralelo, con orificios a lo largo de las mismas, por donde se inyecta el aire a la pila de compostaje.

Con base en las consideraciones anteriores, se establecen las partes o mecanismos principales con los cuales debe contar el sistema, estos son:

- Mecanismo de inyección forzada de aire mediante un ventilador centrífugo.
- Sistema de distribución del aire, que se inyecta por la parte inferior de la pila de compostaje mediante tuberías que poseen pequeños orificios espaciados regularmente a lo largo de las mismas.
- Sistema que permita el funcionamiento automático del ventilador centrífugo (sistema electrónico y de control).

### 3.3. Cálculos

#### 3.3.1. Datos:

**Tabla 16-3** Datos considerados para cálculos (Ver apartado 1.9.7)

<i>Cantidad de materiales a tratar</i>	<i>2000 kg</i>
<i>Humedad de la mezcla de materiales</i>	70%
<i>Humedad deseada</i>	60%
<i>Temperatura del aire que entra a la pila <math>T_e</math></i>	13°C / 286.15 K
<i>Temperatura de salida del aire de la pila <math>T_s</math></i>	60°C / 333.15 K
<i>Humedad relativa del aire de entrada (13°C)</i>	77%
<i>Humedad relativa del aire de salida (60°C)</i>	99%
<i>Presión atmosférica total (<math>P_t</math>)</i>	726.04 hPa / 544.58 mmHg
<i>Densidad del aire de entrada (13°C)</i>	1.2334kg/m <sup>3</sup>

Realizado por: Víctor Valverde 2015

#### 3.3.2. Cálculo de la cantidad diaria de sustrato tratado

Se determina la razón de sustrato tratado por día: (Ver apartado 2.3)

$$C_s = \left( \frac{2000kg}{30 \text{ días}} \right) = 66.67 \frac{kg \text{ residuo}}{\text{día}}$$

Para extraer la humedad excesiva del material en el proceso de compostaje se consideró la cantidad de procesamiento de 66.67 kg de mezcla de materiales por día.

### 3.3.3. Cálculo de la cantidad de agua a remover de la mezcla de materiales

$$m_{\text{arem}} = \frac{m_{h1}(H_1 - H_2)}{100 - H_2}$$

Donde:

$m_{\text{arem}}$  es la masa de agua a remover, kg

$H_1$  es la humedad inicial de la mezcla a compostar

$H_2$  es la humedad deseada del material

$m_{h1}$  es la masa del material de la mezcla a compostar, kg

$$m_{\text{arem}} = \frac{66.67(70 - 60)}{100 - 60}$$

$$m_{\text{arem}} = 16.667 \text{ kg agua} = 36.74 \text{ lb agua}$$

La cantidad de agua que se deberá remover será de 16.667 kg de agua.

### 3.3.4. Cálculo de la cantidad de aire necesaria para remover la humedad

$$\log PVS = \left( \frac{a}{T_a} \right) + b$$

Donde:

PVS es la presión de vapor de agua saturado (mmHg)

$a$  es una constante, -2238 para vapor de agua.

$b$  es una constante, 8.896 para vapor de agua.

$T_a$  es la temperatura (K)

Aire de Entrada:

$$\log PVS = \left( \frac{-2238}{286.15} \right) + 8.896$$

$$PVS_e = 11.88 \text{ mm Hg}$$

Aire de salida:

$$\log PVS = \left( \frac{-2238}{333.15} \right) + 8.896$$

$$PVS_s = 150.77 \text{ mm Hg}$$

La presión de vapor de agua se calcula por:

$$PV = (HR)PVS$$

Donde:

PV es la presión de vapor de agua

HR es la humedad relativa del ambiente.

Calculo de la presión de vapor de agua del aire de entrada y salida:

Presión de vapor de agua en el aire de entrada:

$$PV = (0.77)11.88 \text{ mm Hg}$$

$$PV_e = 9.1476 \text{ mmHg}$$

Presión de vapor de agua en el aire de salida:

$$PV = (0.99)150.77 \text{ mm Hg}$$

$$PV_s = 149.26 \text{ mmHg}$$

Calculo de la humedad específica del aire de entrada y salida

$$W = 0.622 \left( \frac{P_v}{P_t - P_v} \right)$$

Donde:

W es la humedad específica (lb agua/lb aire seco)

Pv es la presión de vapor de agua, mmHg

Pt es la presión atmosférica total, mmHg

Humedad específica del aire de entrada:

$$W = 0.622 \left( \frac{9.1476}{544.58 - 9.1476} \right)$$

$$W_e = 0.01 \left( \frac{lb\ agua}{lb\ aire\ seco} \right)$$

Humedad específica del aire de salida:

$$W_s = 0.23 \left( \frac{lb\ agua}{lb\ aire\ seco} \right)$$

Calculo de la cantidad de aire requerida para remover el agua

$$m_{aire} = \frac{masa\ de\ agua\ a\ remover(lb)}{W_s - W_e}$$

$$m_{aire} = \frac{36.74}{0.23 - 0.01}$$

$$m_{aire} = 167\ lb\ aire\ seco = 75.75\ kg\ aire\ seco$$

### 3.3.5. *Calculo del flujo de aire requerido para remover la humedad*

Para la determinación del flujo de aire requerido para eliminar el exceso de humedad se usa la siguiente ecuación

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{m_{aire}}{\rho_{aire} t}$$

Donde:

$Q$  es el flujo de aire,  $m^3/min$

$\rho_{aire}$  es la densidad del aire  $kg/m^3$

$m_{aire}$  es la masa de aire (kg)

$t$  es el tiempo (min, hora o día dependiendo de la tasa de aireación establecida)

La densidad del aire a  $13^\circ C$  se calcula usando la tabla de propiedades del aire ANEXO D interpolando sus valores:

$$\frac{(15 - 10)}{(1.225 - 1.246)} = \frac{(13 - 10)}{(x - 1.246)}$$

$$X = 1.2334$$

Calculo del requerimiento de aireación para remover la humedad.

$$Q = \frac{75.75}{1.2334 \text{ dia}}$$

$$Q = 61.41 \frac{m^3}{dia} = 2.56 \frac{m^3}{h}$$

Para que el material cuente con humedad óptima de 60 %, se estima un requerimiento de aireación de  $61.41 m^3/día$  para la mezcla de materiales.

### **3.3.6. Selección del ventilador**

De acuerdo a los requerimientos de aireación, se selecciona un ventilador de 3/4Hp, con diámetro de salida del fluido 4 pulgadas (Ver apartado 1.10.6). La alternativa que nos ofrece el mercado, posee las siguientes características:

**Tabla 17-3** Características del ventilador seleccionado

DATOS SUMINISTRADOS POR EL FABRICANTE	
MARCA	Century Tools
POTENCIA	550W ¾ Hp
VOLTAJE	110V
CORRIENTE	5Amps
FRECUENCIA	60Hz
R.P.M.	3600
DIMENSIONES	400*350*390 mm
Diámetro del conducto de salida	4" / 0.105m
Presión Estática	780Pa / 3.13 Wc

Fuente: Century Tools Inc.

Realizado por: Víctor Valverde 2015

### 3.3.7. Determinación de las características del ventilador

Con un termo anemómetro, se determinó la velocidad de salida del aire en el ventilador.

**Tabla 18-3** Datos obtenidos experimentalmente del ventilador

DATOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE CON EL TERMOANEMOMETRO	
Velocidad de salida del aire	26 m/s

Realizado por: Víctor Valverde 2015

Caudal del ventilador:

$$Q = V * A$$

Donde:

Q es el caudal en m<sup>3</sup>/ hora,

V es la velocidad del aire en m/s, y

A es el área de la sección del conducto en m<sup>2</sup>

Calculo del área de sección transversal en el ventilador.

$$A = \pi \left( \frac{D^2}{4} \right)$$

$$A = \pi \left( \frac{0.105^2}{4} \right)$$

$$A = 8.659 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$Q = 26 * 8.659 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 0.225 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 810 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 476.74 \text{ cfm}$$

El ventilador posee un caudal de 810 m<sup>3</sup>/h.

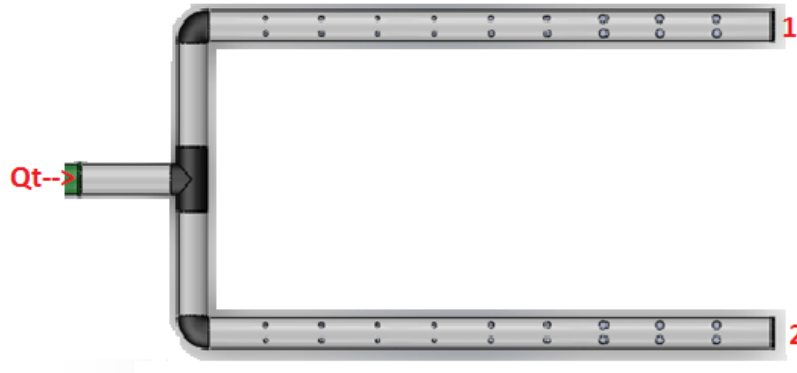
### **3.3.8. Determinación del tiempo de operación del ventilador (Top)**

El ventilador deberá mantenerse encendido en intervalos de un minuto, cada 5 horas, para reducir la humedad de la mezcla de materiales, de un valor de 70% al 60% considerado como valor óptimo. La demanda de aireación para oxigenar la mezcla de materiales se establece para pilas con capacidad de tratamiento de 2000kg en intervalos de aireación de 1 minuto por cada hora (Co-composting of distillery wastes with animal manures: Carbon and nitrogen transformations in the evaluation of compost stability, 2008) (Ver apartado 1.10.6).



### 3.3.9. Cálculos del sistema de tuberías

Un diagrama esquemático del sistema de tuberías es el siguiente: (Ver apartado 1.11.1)



**Figura 43-3** Sistema de tuberías de distribución de aire

Realizado por: Víctor Valverde 2015

$$h_{L1} = h_{L2}$$

$$Q_t = Q_1 + Q_2$$

Datos:

**Tabla 19-3** Características de la tubería de PVC

SISTEMA DE TUBERIA PVC 4" Cédula 80	
<b>Diámetro interno de la tubería</b>	0.1015m
<b>Longitud de las tuberías L1=L2</b>	2.35m

Realizado por: Víctor Valverde 2015

### 3.3.10. Cálculo del caudal y área de sección transversal de las tuberías 1 y 2:

$$A = \pi \left( \frac{D^2}{4} \right)$$

$$A = \pi \left( \frac{0.1015^2}{4} \right)$$

$$A = 8.09 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$Q = 26 * 8.09 \times 10^{-3}$$

$$Q = 0.21 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 757.35 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

**Tabla 20-3** Datos adicionales para cálculos del sistema de tuberías

DATOS ADICIONALES		FUENTE
Densidad del aire a 13°C $\rho$	1.2334 kg/m <sup>3</sup>	Tabla de propiedades del aire a 1 atm de presión ( interpolación)
Viscosidad Cinemática del aire a 13°C $\nu$	1.452x10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s	Tablas de propiedades del aire a 1 atm de presión (interpolación)
Coefficiente de Rugosidad absoluta $e$	1.5x10 <sup>-6</sup> m	Tabla 10-1 Valores típicos de coeficientes de rugosidad
CONSTANTES DE ACCESORIOS		
Accesorio	L/D	Fuente
T	67	Tabla 9-1 coeficiente L/D en pérdidas singulares
Codo 90 radio corto	32	Tabla 9-1 coeficiente L/D en pérdidas singulares

Realizado por: Víctor Valverde 2015

Reemplazando:  $V = \frac{Q}{A}$

Donde:

Q es el caudal del aire (m<sup>3</sup>/s)

A es el área de sección transversal de la tubería. (m<sup>2</sup>)

En las ecuaciones para:

Calculo de pérdidas por fricción en la tubería:

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} = f \frac{L}{D} \frac{Q^2}{2g * A^2}$$

$h_f$  es la carga debida a la fricción. (m)

f es el factor de fricción de Darcy (Adimensional)

L es la longitud de la tubería. (m)

D es el diámetro de la tubería. (m)

V es la velocidad media del fluido. (m/s)

g es la aceleración de la gravedad  $\approx 9,80665 \text{ m/s}^2$

Calculo de pérdidas por accesorios:

$$h_{acc} = \frac{k V^2}{2g} = \frac{k Q^2}{2g * A^2}$$

Donde:

K es la constante para cada accesorio

V es la velocidad del fluido

g es la aceleración de la gravedad

En tabla 9-1:

Para T:  $L/D=67 \quad \rightarrow \quad k=67f_T$

Para codo:  $L/D=32 \quad \rightarrow \quad k=32f_T$

Para la T:

$$h_T = \frac{67f_T Q^2}{2g * A^2}$$

Para codo de 90°:

$$h_{cod} = \frac{32f_T Q^2}{2g * A^2}$$

Pérdidas totales:

$$h_L = h_{f1} + h_{acc1}$$

$$h_L = h_{f1} + h_T + h_{cod}$$

$$h_L = \left[ \left( f \frac{L}{D} \frac{Q^2}{2g * A^2} \right) + \left( \frac{67f_T Q^2}{2g * A^2} \right) + \left( \frac{32f_T Q^2}{2g * A^2} \right) \right]$$

Sacando factor común:  $\frac{Q_1^2}{2g * A_1^2}$

$$h_L = \frac{Q^2}{2g * A^2} \left[ \left( f \frac{L}{D} \right) + 67f_T + 32f_T \right]$$

Para el tramo de tubería 1:

$$h_{L1} = \frac{Q_1^2}{2g * A_1^2} \left[ \left( f_1 \frac{L_1}{D_1} \right) + 99f_T \right]$$

Para el tramo de tubería 2:

$$h_{L2} = \frac{Q_2^2}{2g * A_2^2} \left[ \left( f_2 \frac{L_2}{D_2} \right) + 99f_T \right]$$

Igualando las pérdidas:

$$\frac{Q_1^2}{2g * A_1^2} \left[ \left( f_1 \frac{L_1}{D_1} \right) + 99f_T \right] = \frac{Q_2^2}{2g * A_2^2} \left[ \left( f_2 \frac{L_2}{D_2} \right) + 99f_T \right]$$

$$\frac{Q_1}{A_1} \sqrt{\left[ \left( f_1 \frac{L_1}{D_1} \right) + 99f_T \right]} = \frac{Q_2}{A_2} \sqrt{\left[ \left( f_2 \frac{L_2}{D_2} \right) + 99f_T \right]}$$

$$Q_1 = \left[ \sqrt{\frac{\left( f_2 \frac{L_2}{D_2} \right) + 99f_T}{\left( f_1 \frac{L_1}{D_1} \right) + 99f_T}} \right] \frac{A_1 Q_2}{A_2}$$

$$Q_t = Q_1 + Q_2$$

$$Q_2 = Q_T - Q_1$$

$$Q_1 = \left[ \sqrt{\frac{\left(f_2 \frac{L_2}{D_2}\right) + 99f_T}{\left(f_1 \frac{L_1}{D_1}\right) + 99f_T}} \right] \frac{A_1(Q_T - Q_1)}{A_2}$$

Haciendo:

$$B = \left[ \sqrt{\frac{\left(f_2 \frac{L_2}{D_2}\right) + 99f_T}{\left(f_1 \frac{L_1}{D_1}\right) + 99f_T}} \right] \frac{A_1}{A_2}$$

Entonces:

$$Q_1 = B(Q_T - Q_1)$$

Despejando:

$$Q_1 = \frac{BQ}{B+1}$$

$$Q_T = 0.21 \text{ m}^3/\text{s}$$

Como las dos secciones de tubería son iguales, entonces: B=1

### 3.3.11. *Calculo del caudal en cada rama.*

$$Q_1 = \frac{Q_T}{2} = \frac{0.21}{2}$$

$$Q_1 = Q_2 = 0.105 \text{ m}^3/\text{s}$$

### 3.3.12. *Determinación de la velocidad de salida en cada rama*

$$V_1 = V_2 = \frac{Q}{A} = \frac{0.105}{8.09 \times 10^{-3} \text{ m}^2}$$

$$v = 12.97 \text{ m/s}$$

Estos datos obtenidos mediante cálculo, han sido comprobados experimentalmente mediante la medición de la velocidad en cada rama del sistema de tuberías, ambas ramas presentan velocidades relativamente iguales.

### 3.3.13. Cálculo del diámetro y espaciamiento de los orificios en las secciones longitudinales de las tuberías.

Para esta determinación, se realizó una simulación de la trayectoria del fluido a través de las líneas de conducción, en un software de análisis y aplicación de elementos finitos y dinámica de fluidos computacional denominado ANSYS, obteniendo como resultados:

**Tabla 21-3** Distribución de los orificios a lo largo de la tubería

DISTRIBUCION ORIFICIOS	
Sección longitudinal (m)	2
Orificios por sección	9
Longitud entre orificios (m)	0.2m
Numero orificio	Dimensión (m)
1	0.020
2	0.020
3	0.020
4	0.020
5	0.025
6	0.025
7	0.0275
8	0.0275
9	0.0275

Realizado por: Víctor Valverde 2015

Un plano del sistema de tuberías con sus correspondientes dimensiones y distribución se presenta en el anexo G de este documento.

### 3.4. Dimensionamiento

En base a los cálculos de ingeniería realizados para el diseño del sistema de aireación, tenemos los siguientes datos de dimensionamiento:

El sistema de conducción del fluido se lo fabricará en PVC de 4 pulgadas de diámetro nominal, cuyas medidas serán 2.35m de longitud en cada rama, con sus correspondientes accesorios una T que divide en dos ramas al sistema, y un codo que cambia la trayectoria de la línea de tubería en cada una de las ramas , siendo ambos accesorios de PVC, la sección útil para la transferencia del aire hacia la pila de

compostaje es de 2m de tubería de sección recta, misma que posee un total de 9 orificios de diferente diámetro a lo largo de la misma ( ANEXO G).

La aireación para este sistema de tuberías está provista por un ventilador centrífugo de paletas radiales con una potencia de 0.75Hp, que entrega un caudal máximo de 810m<sup>3</sup>/h de aire ambiente con una velocidad promedio de 26m/s a través de una sección de salida de 4 pulgadas.

El conjunto ventilador - sistema de tuberías posee uniones herméticas que garantizan el paso del fluido hacia los orificios de salida del mismo, disminuyendo las pérdidas por fugas dentro de la tubería

**Tabla 22-3** Dimensionamiento del sistema de aireación forzada

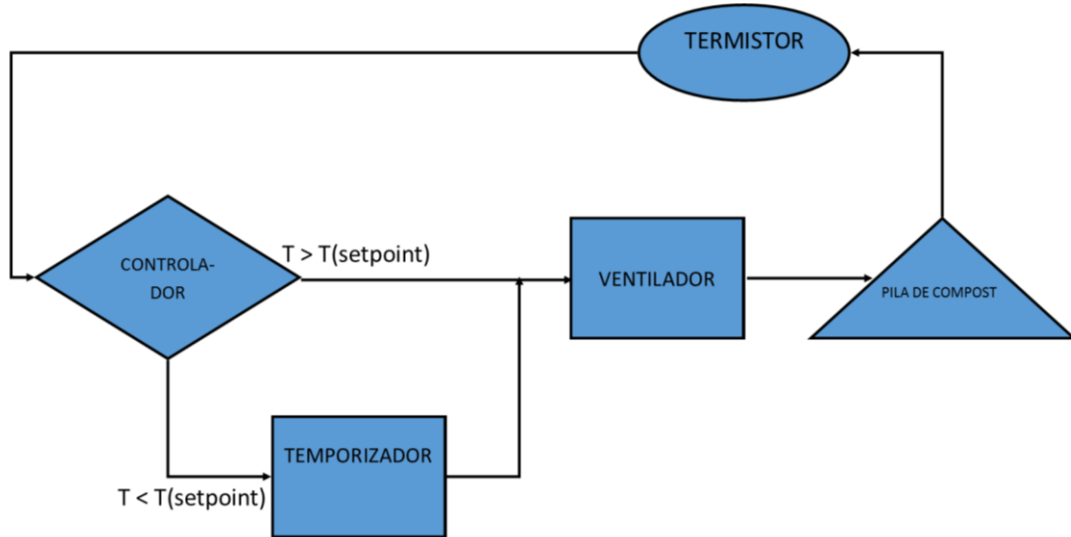
DESCRIPCION	VARIABLE	INDICADOR
VENTILADOR		
Caudal del ventilador	810	m³/h
Velocidad	26	m/s
Potencia Requerida	0.75	Hp
Dimensiones	400*350*390	mm
Diámetro del conducto de salida	0.105	m
Presión Estática	780	Pa
Material	Acero inoxidable #304	
SISTEMA DISTRIBUCION DE AIRE		
Material	PVC cedula 80, 4 pulgadas de diámetro	
Diámetro	0.1015	m
Longitud Útil	2 secciones x 2	m

Realizado por: Víctor Valverde 2015

### 3.5. Automatismo

#### 3.5.1. Diseño del sistema de control automático

El esquema lógico de control que regirá el proceso, es el siguiente:



**Figura 44-3** Esquema lógico del sistema de control diseñado.

Realizado por: Víctor Valverde 2015

#### 3.5.2. Automatización

Partiendo de la ecuación del balance de energía:

$$q\rho C_p T_{i(t)} - q\rho C_p T_{f(t)} + C_p [T_{f(t)} - T_s] = \frac{d(V\rho V C_v T_{(t)})}{dt}$$

Empleando artificios matemáticos, y asignando valores a constantes:

$$\frac{q\rho C_p T_{i(t)}}{q\rho C_p + C_p} - \frac{q\rho C_p T_{f(t)}}{q\rho C_p + C_p} + \frac{C_p [T_{f(t)} - T_s]}{q\rho C_p + C_p} = \frac{\frac{d(V\rho V C_v T_{(t)})}{dt}}{q\rho C_p + C_p}$$

$$\tau = \frac{\rho V C_v}{\rho q C_p + C_p}$$



$$K_1 = \frac{\rho q C_p}{\rho q C_p + C_p}$$

$$K_2 = \frac{C_p}{\rho q C_p + C_p}$$

$$K_1 T i_{(s)} = T f_{(s)} [\tau_s + K_1 - K_2]$$

$$\frac{T f_{(s)}}{T i_{(s)}} = \frac{K_1}{\tau_s + K_1 - K_2} = G_{(s)}$$

La anterior ecuación se conoce como la ecuación típica de un proceso lineal de primer orden, y relaciona la temperatura de salida con la de entrada, con variación en la misma por las constantes anteriormente definidas, lo que gráficamente se traduce en:

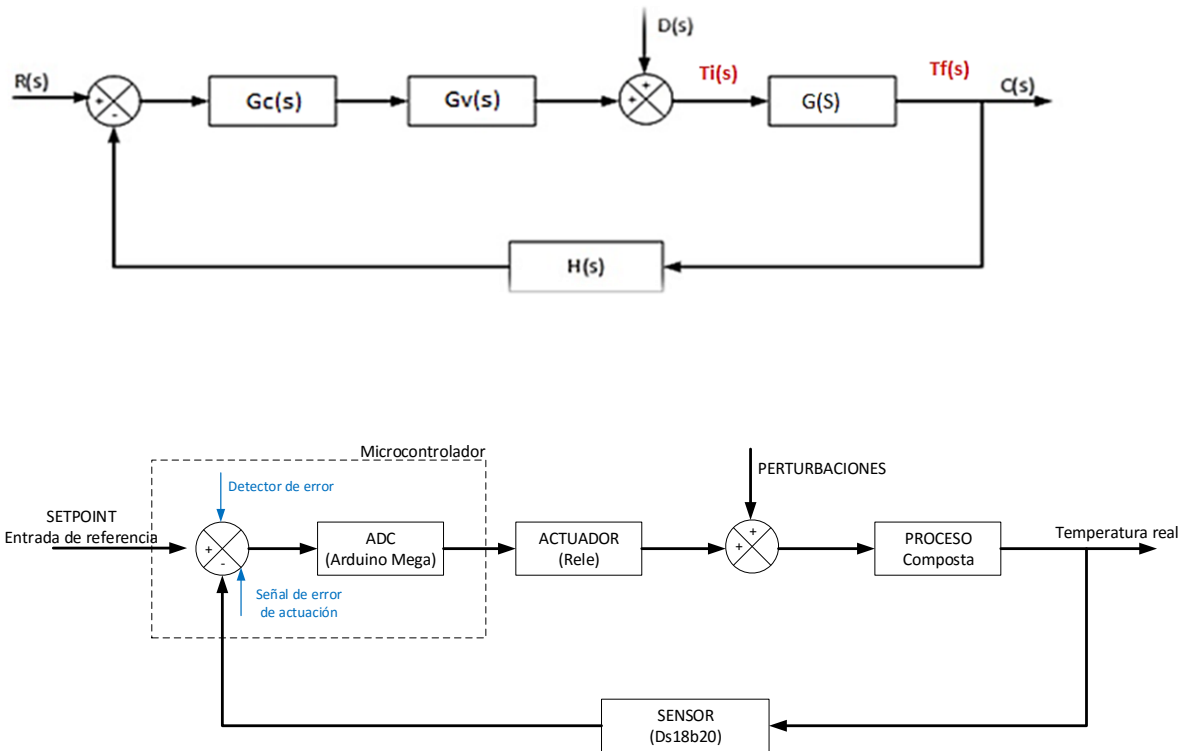


Donde:

$G(s)$  es la función de transferencia para el proceso de compostaje.

Para controlar la temperatura de salida de las pilas, y compensar las perturbaciones que existen en el proceso, se integra un control retroalimentado como se muestra a continuación.

### 3.5.3. Diagrama de bloques del sistema de control

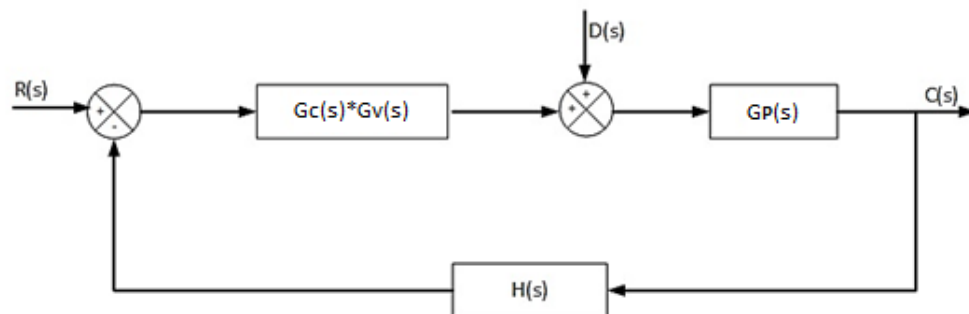


**Figura 45-3** Diagrama de bloques del sistema de control del proceso de compostaje

Realizado por: Víctor Valverde 2015

### 3.5.4. Reducción del diagrama de bloques

La reducción del diagrama anterior, se presenta a continuación. (Ver figura 36-1)



**Figura 46-3** Diagrama de bloques reducido del sistema de control del proceso de compostaje

Realizado por: Víctor Valverde 2015

### 3.5.5. Cálculo de la respuesta para la perturbación

Esta respuesta se encuentra a partir de:

$$\frac{C_D(s)}{D(s)} = \frac{G_P(s)}{1 + G_C(s) G_V(s) G_P(s) H(s)}$$

La respuesta  $C_R(s)$  a la entrada de referencia  $R(s)$  se obtiene a partir de:

$$\frac{C_R(s)}{R(s)} = \frac{G_C(s) G_V(s) G_P(s)}{1 + G_C(s) G_V(s) G_P(s) H(s)}$$

La respuesta a la aplicación simultánea de la entrada de referencia y la perturbación se obtiene sumando las dos respuestas individuales.

$$C(s) = C_R(s) + C_D(s)$$

$$C(s) = \frac{G_P(s)}{1 + G_C(s) G_V(s) G_P(s) H(s)} [G_C(s) G_V(s) R(s) + D(s)]$$

Considerando el caso en el que:

$|G_C(s) G_V(s) H(s)|$  se aproxime a 1 y  $|G_C(s) G_V(s) G_P(s) H(s)|$  se aproxime a 1.

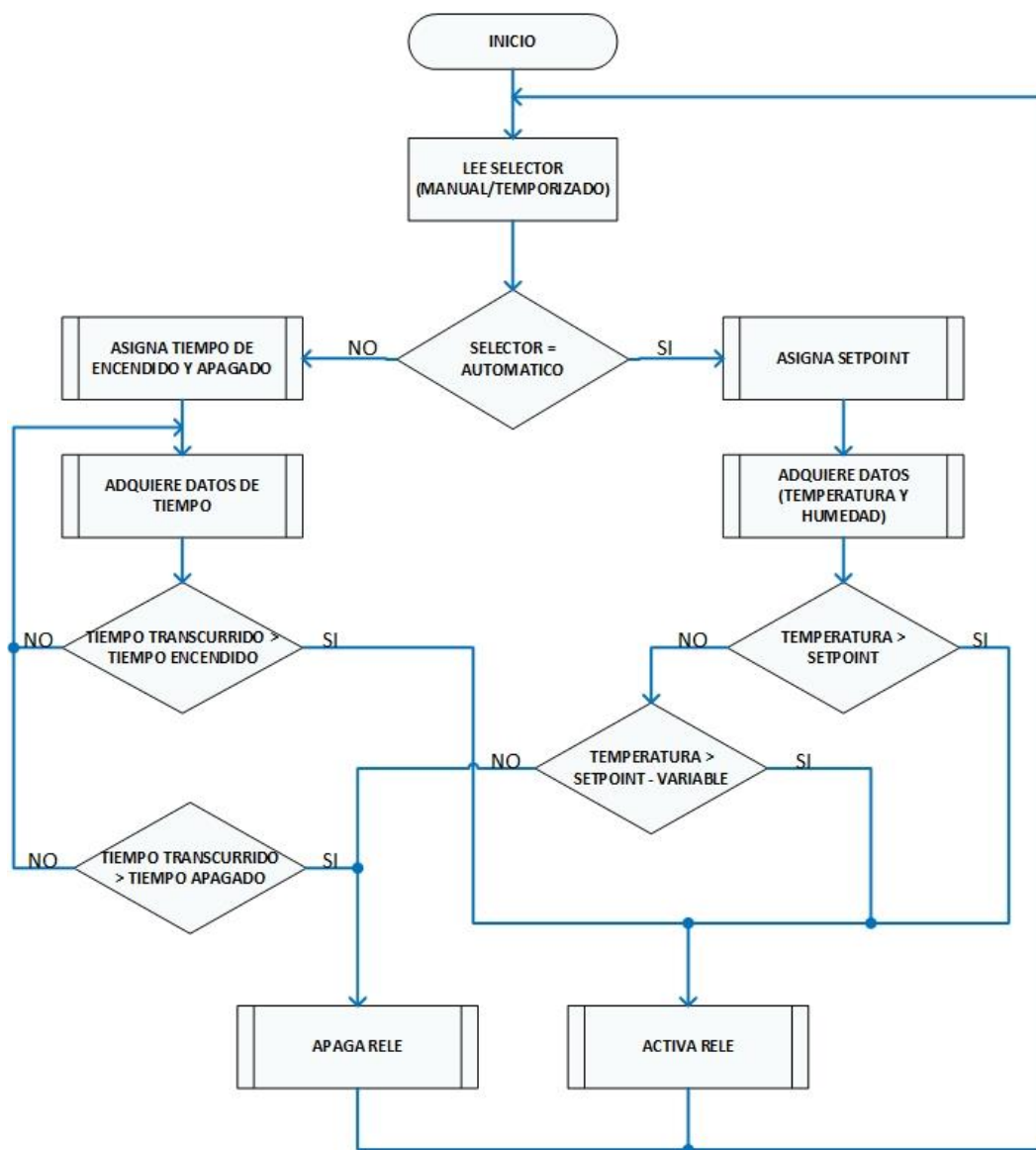
En este caso, la función de transferencia en lazo cerrado  $C_D(s)/D(s)$  se aproxima a cero, y se suprime el efecto de la perturbación.

Por otra parte, la función de transferencia en lazo cerrado  $C_R(s)/R(s)$  se aproxima a  $1/H(s)$  conforme aumenta la ganancia de  $G_C(s) G_V(s) G_P(s) H(s)$ .

Esto significa que si  $|G_C(s) G_V(s) G_P(s) H(s)| \gg 1$ , entonces la función de transferencia en lazo cerrado  $C_R(s)/R(s)$  se vuelve independiente de  $G_C(s)$ ,  $G_V(s)$  y  $G_P(s)$ , y se hace inversamente proporcional a  $H(s)$ , por lo que las variaciones de  $G_C(s) G_V(s)$  y  $G_P(s)$  no afectan a la función de transferencia en lazo cerrado  $C_R(s)/R(s)$ .

Por lo tanto se observa que en este sistema de lazo cerrado con una realimentación unitaria,  $H(s) = 1$ , se tiende a igualar la entrada y la salida. Es decir se comprueba con los elementos que conforman el sistema de control, que el sistema de control retroalimentado elimina las perturbaciones.

### 3.5.6. Diagrama lógico del micro controlador



**Figura 47-3** Diagrama de flujo lógico del controlador diseñado

Realizado por: Víctor Valverde 2015

### 3.6. Tipos de materiales

#### 3.6.1. Materiales para el sistema de aireación

**Tabla 23-3** Materiales usados en el sistema de distribución de aire

DENOMINACIÓN	CARACTERÍSTICAS	CANTIDAD
<b>VENTILADOR CENTRIFUGO</b>	0.75 Hp	1
<b>TUBERIA PVC</b>	4" diámetro x 3m largo	2
<b>CODOS PVC</b>	4" x 90°	2
<b>T PVC</b>	4"	1
<b>Tapones PVC</b>	4"	2
<b>Materiales Adicionales</b>	Varios	

Realizado por: Víctor Valverde 2015

#### 3.6.2. Materiales para automatización

**Tabla 24-3** Materiales usados para automatización

DENOMINACIÓN	CARACTERÍSTICAS	CANTIDAD
<b>Arduino mega 2560 R3</b>	Placa micro controladora	1
<b>DS18B20</b>	Sonda digital de temperatura para sustratos (-10 a 95°C) x 3m	1
<b>DHT11</b>	Sensor digital de Humedad y Temperatura H (20-90%) T (0-50°C)	1
<b>KP64B4X4</b>	Teclado de membrana Matrix 4x4 Arduino	
<b>AMC2004ABY6WFDY</b>	LCD 4 líneas, 20 columnas Arduino, MCU.	1
<b>SRD-12VDC</b>	Modulo Relé de 1 canal	1
<b>RTC DS3231</b>	Modulo reloj de precisión Arduino	1
<b>DC110TPVXA</b>	Fuente de 9v 1000Ma	1
<b>AD16-22D</b>	Luz piloto (rojo-verde)	2
<b>S-LPL42</b>	Selector de 2 posiciones	1
<b>JV-EV-AM-LP-CG</b>	Armario Metálico 250x250x100mm	1

Realizado por: Víctor Valverde 2015

### 3.7. Requerimiento presupuestario

El análisis de costos abarca los costos de materiales, costos de mano de obra, así como costos fijos y de operación

#### 3.7.1. Recursos humanos

**Tabla 25-3** Recursos humanos

RECURSO	MONTO (USD)
Mano de obra para construcción del sistema de aireación	50
Mano de obra para la automatización	250
<b>TOTAL</b>	<b>300</b>

Realizado por: Víctor Valverde 2015

#### 3.7.2. Recursos materiales

**Tabla 26-3** Recursos materiales

RECURSO	MONTO (USD)
Materiales y suministros de Oficina	150
Materiales para la construcción del sistema de aireación	220
Materiales para la automatización	350
<b>TOTAL</b>	<b>720</b>

Realizado por: Víctor Valverde 2015

#### 3.7.3. Recursos totales

**Tabla 27-3** Recursos totales

ITEM	MONTO (USD)
Recursos Humanos	300
Recursos Materiales	720
Subtotal	1020
Imprevistos (15%)	102
<b>TOTAL</b>	<b>1122</b>

Realizado por: Víctor Valverde 2015

### 3.8. Resultados

#### 3.8.1. Resultados del dimensionamiento

**Tabla 28-3** Resultados del dimensionamiento del sistema de aireación

CALCULO	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
Cantidad diaria de sustrato a tratar	Cs	66.67	Kg/día
Cantidad de agua a remover de la mezcla	m <sub>arem</sub>	16.67	Kg agua
Cantidad de aire necesaria para remover la humedad de la mezcla	m <sub>aire</sub>	75.75	Kg aire
Flujo de aire requerido para remover la humedad de la mezcla	Q	61.41	m <sup>3</sup> /día
Tiempo de operación del ventilador centrifugo (solo para remover el exceso de humedad)	Top	1	min/h
Caudal en cada línea de tubería	Q <sub>1</sub> , Q <sub>2</sub>	0.105	m <sup>3</sup> /s
Velocidad en cada línea de tubería	V <sub>1</sub> , V <sub>2</sub>	12.97	m/s

Realizado por: Víctor Valverde 2015

#### 3.8.2. Validación del equipo

Para comprobar la efectividad práctica de operación del equipo construido se realiza un análisis de su comportamiento a través del ensayo de su funcionamiento simulando el caso de aplicación para el cual fue diseñado.

Para este fin se ensambló el equipo diseñado con los dos mecanismos que lo conforman, es decir el sistema de distribución de aire y el sistema de control automático.

En primer lugar se realiza la identificación de todos los elementos que componen el sistema de aireación forzada como el modulo controlador de temperatura y aireación, con sus correspondientes sensores, el ventilador que proveerá el aire a la mezcla de materiales, y las tuberías que distribuirán el aire.

Se coloca el sistema de tuberías de manera horizontal sobre una superficie plana; sobre las secciones de tubería que estarán en contacto con la mezcla de materiales se coloca una fina capa de material que permita la salida del aire por los orificios (paja), sobre esta capa se colocó cierta cantidad de materia con características similares a las requeridas para el funcionamiento del equipo. Se establece que el sensor de temperatura debe estar ubicado en la parte interna central de la mezcla de materiales, para garantizar que la medición se realice en el punto que presente mayor temperatura. El sensor se colocó a una altura de 30 cm aproximadamente. Seguidamente se pone en funcionamiento el equipo de control, el mismo monitorea en tiempo real la temperatura interna de la mezcla de materiales, así como la temperatura y humedad ambiente. El equipo posee dos modos de operación: operación temporizada en intervalos mediante tiempos de encendido y de apagado programados en el panel de control del equipo, y control de la temperatura bajo demanda.

Para la demostración del modo de operación temporizado del equipo, se sitúa la posición del interruptor del equipo en el modo temporizado. Para fines demostrativos, se consideran adecuados intervalos de tiempo de encendido de 25 segundos seguidos de un tiempo de apagado de 10 segundos, valores que se programan en el equipo mediante el teclado, y se comprueba la operación y pausa del ventilador en dichos intervalos.

Para la determinación de la operación del equipo en el modo de control de la temperatura de la mezcla, se coloca el interruptor del equipo en la posición de operación automática, y se procede a programar la temperatura máxima o set point en el teclado del sistema de control. En la simulación se usó un Setpoint de 70 °C. Se simula el incremento de la temperatura de la mezcla de materiales hasta alcanzar la temperatura programada, y se verifica el accionamiento del ventilador con la correspondiente distribución de aire a la mezcla de materiales, que enfriará la misma y disminuirá la temperatura medida por el sensor, haciendo que el ventilador se apague al alcanzar un valor inferior a la temperatura deseada.

Los procedimientos para introducción de los tiempos de operación en el modo temporizado, y la temperatura máxima en el modo automático se describen en el manual de operación del equipo (ANEXO L). Se presenta un video demostrativo del procedimiento explicado anteriormente.

Los resultados de esta simulación evidencian en correcto funcionamiento del sistema de aireación forzada, haciendo del equipo evaluado un sistema válido para el co-compostaje de los residuos hortícolas en la Comunidad de Gatazo Cantón Colta, y ratificando el correcto funcionamiento del mismo.



### **3.9. Análisis y discusión de resultados**

Se obtuvieron datos sobre métodos de compostaje, configuraciones de las pilas de compost, tipos de residuos tratados, cantidades, variables a controlar, y se definieron las características de los materiales y equipos a usar en esta investigación, los mismos fueron trascendentales para los cálculos de diseño.

Para el diseño del sistema de aireación forzada, primero se identificaron las variables de proceso: humedad de la mezcla de materiales, temperatura máxima en el proceso o setpoint, y concentración de oxígeno necesaria. En relación a la humedad que presenta la mezcla de materiales, el equipo fue diseñado para remover el exceso ( $>60\%$ ), el equipo mantiene la concentración de oxígeno de la mezcla de materiales a compostar en rangos aceptables ( $5-15\%$ ).

El equipo se diseñó para tratar una cantidad aproximada de 66.67 kg de mezcla de materiales por día, que conforman la pila de compost.

Mediante cálculos se determinó que el sistema de aireación removerá 16.67 kg de agua mediante el suministro de 75.75 kg de aire a la mezcla de materiales, valor que se traduce en una razón diaria de  $61.41\text{ m}^3/\text{día}$  de aire suministrado para ajustar la humedad a su valor óptimo ( $60\%$ ).

Cabe mencionar que estos valores se basaron en las características iniciales de los materiales; por tanto el tiempo de operación necesario del ventilador depende de la humedad inicial de la mezcla de materiales. El tiempo de operación del ventilador para las condiciones definidas, se estableció en 1 minuto por cada hora. El caudal proporcionado por el ventilador a cada línea de tubería fue de  $0.105\text{ m}^3/\text{s}$  con una velocidad de  $12.97\text{ m/s}$ . (Ver Tabla 28-3)

Para garantizar la distribución uniforme de aire a través de las pilas de compost, el mismo se condujo a través de un sistema de tuberías con orificios a lo largo de su sección longitudinal por donde el aire fue distribuido. Para este fin, y para remover el exceso de calor de la mezcla de materiales, se usó un ventilador de 0.75 Hp (ver tabla 17-3).

Para remover el exceso de calor, el sistema de control retroalimentado monitoreó la temperatura interior de la pila de compostaje, y mantuvo la misma en valores inferiores al setpoint programado que fue de  $70^\circ\text{C}$ . Además se evaluó el modo de operación temporizado, e intervalos de operación de 25 segundos de encendido y 10 segundos de apagado. (Ver apartado 3.8.2)

El equipo fue sometido a una simulación operativa para fines de validación, cumpliendo satisfactoriamente los resultados esperados. (Ver apartado 3.8.2)

El presupuesto necesario para la construcción e implementación de este sistema en la comunidad de Gatazo fue de 1122 dólares, siendo el costo más representativo el sistema de control automático, seguido del ventilador centrifugo y el sistema de tuberías el más económico ( ver tabla 26-3).

## CONCLUSIONES

- Se determinó que las variables críticas en el proceso de compostaje son la temperatura, humedad y la concentración de oxígeno. En la etapa termofílica se debe alcanzar una temperatura máxima de 35°C y en la etapa activa del proceso se debe mantener una temperatura máxima de 65°C. La humedad óptima para la descomposición es de 60% y la concentración de oxígeno adecuada está en el intervalo de 5-15%.
- Se realizó el diseño del sistema de aireación forzada destinado a la producción de compost con residuos agroindustriales en la comunidad de Gatazo, el sistema integra un ventilador encargado de suministrar el aire, y un sistema de tuberías dimensionado en base a los cálculos realizados, como parte del diseño se establecieron los materiales usados en la construcción.
- Se diseñó una estructura de control automática para el control de la temperatura interna de las pilas de compostaje, en la misma fue necesario integrar un control retroalimentado que suministre aire cuando sea necesario a la mezcla para evitar un incremento excesivo en su temperatura, y un modo de operación mediante intervalos de tiempo programados, este modo garantiza una adecuada aireación de la mezcla de materiales.
- Se determinó el requerimiento presupuestario para la construcción e implementación del equipo para el fin propuesto. Los resultados obtenidos fueron muy favorables, lo que lo convierte en una alternativa económica con bajos costos de implementación para quienes requieran aplicar este estudio.
- El equipo diseñado posee materiales de características adecuadas para trabajar en el medio para el cual fue diseñado, como el PVC, que es un material económico, resistente a condiciones de humedad, corrosión y el contacto con todo tipo de bacterias y microorganismos que intervienen en el proceso.
- El equipo diseñado se convierte en una herramienta de remediación ambiental, gestión y aprovechamiento de residuos agrícolas procedentes de las actividades de: cultivo, comercio y utilización doméstica.

## RECOMENDACIONES

- Es importante respetar las condiciones para las cuales se diseñó el sistema de aireación, una capacidad de tratamiento de aproximadamente 2000 kg de mezcla de materiales, ya que un exceso de la misma no permitirá una correcta descomposición y por lo tanto el sistema de aireación no cumplirá su objetivo.
- Implementar el diseño propuesto en la comunidad de Gatazo y otros sectores agrícolas, como una solución ecológica a problemas de contaminación ambiental causados al recurso suelo; debido a las malas prácticas agrícolas.
- Es necesario realizar un pre-tratamiento a los residuos hortícolas que serán compostados, utilizando técnicas de trituración, selección y acondicionamiento mediante el uso de maquinarias y equipos para conferir a los mismos, características que garanticen su descomposición.
- No se recomienda la utilización de tuberías de hierro o de cualquier otro material corrosivo en el sistema tubería de distribución de aire debido a la exposición a humedad, oxígeno y materias orgánicas que pueden debilitar su estructura.
- Realizar una investigación de campo comparativa entre el sistema diseñado y sistemas tradicionales, con la finalidad de obtener resultados como: rendimientos de producción, tiempo de compostaje, características finales del producto, consumo energético, etc. para de esta manera evaluar la efectividad del sistema.
- Es necesario capacitar al personal ejecutor del proceso de compostaje en el manejo del equipo, así como seguir la metodología indicada en los manuales incluidos como anexos en esta investigación para un óptimo desempeño del proceso de compostaje mediante el método de aireación forzada.
- Continuar con la investigación de tecnologías de tratamiento de residuos agroindustriales e implementar esta propuesta a escala industrial, como una herramienta aprovechable en los diversos sectores agrícolas del país.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Agnew, J., & Leonard, J. (2003). "The physical properties of compost". *Compost Science and Utilisation*(11), 238-264.
2. Alburquerque, J., Gonzalez, J., Garcia, D., & Cegarra, J. (2004). Agrochemical characterisation of « Alperujo », a solid by product of the two phase centrifugation method for olive oil extraction. *Biores. Technol.*(91), 195-200. Recuperado el 4 de Abril de 2015
3. Alburquerque, J., Gonzalez, J., Garcia, D., & Cegarra, J. (2006). Composting of a solid olive-mill by-product ("alperujo") and the potential of the resulting compost for cultivating pepper under commercial conditions. *Waste Manage*(26), 620-626.
4. Amigos de la Tierra. (2009). *Ventajas del compostaje*. Obtenido de [www.tierra.org:https://www.tierra.org/spip/IMG/pdf/Informe\\_compost\\_web\\_con\\_tabla\\_buena-1.pdf](http://www.tierra.org:https://www.tierra.org/spip/IMG/pdf/Informe_compost_web_con_tabla_buena-1.pdf)
5. Arántegui, J. (2010). *Control de procesos*. Obtenido de scribd: <http://es.scribd.com/doc/283914044/Control-de-Procesos-J-Arantegui>
6. Association., J. S. (1995). Environmental Technology. *JIS Handbook, 1995*, (págs. 553-638). Tokyo.
7. Atkinson. (1991). *Heat Balances in Biorreactors*.
8. Bari, Q., & Koenig, A. (2001). Effect of air recirculation and reuse on composting of organic solid waste. *Resources, Conservation and Recycling* (31), 93-111.
9. Barrington, S., Choinière, D., Trigui, M., & Knight, W. (2002). Compost Airflow Resistance. *Biosystems Engineering*(81), 433-441.
10. Bernal, M. (2008). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity. *Bioresource Technology*, 5444-5452.
11. Berthe, L., Druilhe, C., & Massiani. (2007). Coupling a respirometer and a pycnometer, to study the biodegradability of solid organic wastes during compostings. *Biosystems Engineering*(97), 75-88.
12. Biddlestone, A., & Gray, K. (1985). Composting. *Comprehensive biotechnology*., 4, 1059-1070.

- 13. Bustamante, M., Paredes, C., Marhuenda-Egea, Bernal, M., & Moral, R. (2008).** Co-composting of distillery wastes with animal manures: Carbon and nitrogen transformations in the evaluation of compost stability. *Chemosphere*(72), 551-557. Obtenido de [www.elsevier.com/locate/chemosphere](http://www.elsevier.com/locate/chemosphere)
- 14. Cannel, E., & Moo-Young, M. (1980).** Solid-state fermentation systems. *Process Biochem.*(15), 2-7.
- 15. Casco, J., & Herrero, J. (2008).** *Compostaje*. Valencia: Editorial Científicos.
- 16. Cayuela, M., Sánchez, M., & Roig, A. (2006).** Evaluation of two different aeration systems for composting two-phase olive mill wastes. *Process Biochemistry*(41), 616-623.
- 17. Chang, J., Tsai, J., & Wu, K. (2006).** Thermophilic composting of food waste. *Bioresource Technology*(97), 116-122.
- 18. Chapman, H., & Johnson, Z. (2002).** Use of antibiotics and roxarsone in broiler chicken in the USA: analysis for the years 1995 to 2000. *Poultry Science*, 81, 356-364.
- 19. COMPOST SEGRIÁ. (2013).** *COMPOST SEGRIÁ*. Obtenido de Compost Segrià S.A.: <http://www.compostsegria.com/>
- 20. Cornell. (2013).** *Composting. The Science and Engineering of Composting*. Obtenido de Cornell University: <http://www.css.cornell.edu/compost/science.html>
- 21. Crites, R., & Tchobanoglous, G. (2000).** *Tratamiento de Aguas Residuales para poblaciones pequeñas*. Bogotá-Colombia: McGraw-Hill.
- 22. Diaz, M., Madejon, E., López, F., López, R., & Cabrera, F. (2002).** Optimization of the rate vinasse/grape marc for co-composting process. *Process Biochemistry*(37), 1143-1150.
- 23. Dick, W., & McCoy, E. L. (1993).** *Enhancing soil fertility by addition of composts. Science and Engineering of Composting: design, environmental, microbiological and utilization aspects*. Ohio: Renaissance Publications.
- 24. Durand, A., de la Broise, D., & Blachere, H. (1988).** Laboratory scale bioreactor for solid state process. *J. Biotechnol.*(8), 59-66.

- 25.Ekinci, K., Keener, H., & Akbolat, D. (2006).** Effects of feedstock, airflow rate, and recirculation ratio on performance of composting systems with air recirculation. *Bioresource Technology*(97), 922-923.
- 26.Environmental Engineering National Engineering Handbook. (2000).** En U. S. Agriculture, *Compost*.
- 27.EPA. (2015).** EPA . Obtenido de Agencia de Proteccion Ambiental de Estados Unidos: <http://www.epa.gov/espanol/sobreepa/>
- 28.Epstein, E. (1997).** The science of composting. *Technomic Publishing Co., Inc. USA (1997)* pp 19-32., 19-32.
- 29.Fang, M., & Wong, J. (1999).** Effects of lime amendment on availability of heavy metals and maturation in sewage sludge composting. *Environ. Pollut.*(106), 83-89.
- 30.FAO. (2012).** *Manual de practicas de manejo postcosecha de los productos hortofrutícolas.* Obtenido de [www.fao.org](http://www.fao.org): <http://www.fao.org/wairdocs/x5403s/x5403s0a.htm>
- 31.Figueiredo, S., & E., S. (2002).** Evaluating the potential of an electronic nose for detecting the onset of anaerobic conditions during composting. *Bioprocessing of Solid Waste and Sludge, II*, 1-7.
- 32.Finger, S., Hatch, R., & Regan, T. (1976).** Aerobic microbial growth in semisolid matrices: heat and mass transfer limitation. *Biotechnol. Bioeng.*(18), 1193-1218.
- 33.Finstein, F. C., & Miller, M. G. (1985).** *THE RUTGERS STRATEGY FOR COMPOSTING: PROCESS DESIGN AND CONTROL.* New Jersey.
- 34.Finstein, M., & Hogan, J. A. (1993).** *Integration of composting process microbiology, facility structure and decision-making. Science and Engineering of Composting: design environmental, microbiological and utilization aspects.* Ohio: Renaissance Publications.
- 35.Garcia-Gomez, A., Roig, A., & Bernal, M. (2003).** Composting of the solid fraction of olive mill wastewater with olive leaves: organic matter degradation and biological activity. *Biores. Technol.*(86), 59-64.
- 36.Gavilanes, I., Paredes, C., & Perez, A. (2014).** *Oportunidades y desafíos de la gestión de residuos orgánicos procedentes del sector agroindustrial en América del Sur: Provincia de*

*Chimborazo*. Trabajo de maestria, Universidad Miguel Hernandez de Elche, Chimborazo.  
Recuperado el 22 de Agosto de 2015

- 37.Ghaly, A., Alkoaik, F., & Snow, A. (2006).** Thermal balance of invessel composting of tomato plant residues. *Biological Engineering Department, Dalhousie University*, 48, 6.1. Obtenido de Biological Engineering Department, Dalhousie University: <http://www.engr.usask.ca/societies/csae/protectedpapers/c0516p.pdf>
- 38.Gordillo, F., & Chavez. (8 de Octubre de 2010).** Evaluación comparativa de la calidad del compost producido a partir de desechos azucareros. Guayaquil, Guayas, Ecuador.
- 39.Gouleke, C. (1972).** Composting. A study of the Process and its principles. *Rodale Press. inc.*
- 40.Graves, R. (2000).** *Enviromental Engineering National Engineering Handbook*. EEUU: United States Department of Agriculture USA.
- 41.Guardia, D., & col. (2006).** Influence of aeration rate and biodegradability fractionation on composting kinetics. *Waste Management*.
- 42.Guerra-Rodriguez, E., Vasquez, M., & Diaz-Ravina, M. (2000).** co-composting of barley wastes and solid poultry manure. *Biores. Technol*(75), 223-225.
- 43.Gutierrez-Rojas, Hosn, & col. (1996).** Heat transfer in citric acid production by solid state fermentation. *Process Biochem*, 363-369.
- 44.Gutierrez-Rojas, M., & col. (1995).** A mathematical model for solid state fermentation of mycelial fungi on inert support. *Chemical Eng*, 189-198.
- 45.Hachicha y col. (2003).** Effects of partial stone removal on the co-composting of olive-oil processing solid residues with poultry manure and the quality of compost. *Environ. Technol.*, 59-67.
- 46.Hachichaa, c. (2010).** *Eliminación de la toxicidad de los polifenoles de lodos de aguas residuales del molino de oliva mediante su co-compostaje con corteza de sésamo*. Tunisia.
- 47.Haestad Methods. (1998).** *Computer Applications in Hydraulic Engineering*.
- 48.Haug, R. (1993).** *The practical handbook of compost engineering*. USA: Lewis Publishers.



- 49.Huang, G., Fang, M., Wu, Q., Zhou, L., Liao, X., & Wong, W. (2001). Co-composting of pig manure with leaves. *Environ. Technol*(22), 1203–1212.
- 50.ILAC. (2004). *Iniciativa Latinoamericana y Caribeña para el Desarrollo Sostenible: Indicadores de Seguimiento*. Costa Rica.
- 51.INAMHI. (2011). *Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología*. Obtenido de <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/>
- 52.INFOAGRO. (24 de Junio de 2013). *InfoAgro Systems*. Obtenido de Infoagro: [http://www.infoagro.com/hortalizas/residuos\\_agricolas.htm](http://www.infoagro.com/hortalizas/residuos_agricolas.htm)
- 53.INIAP. (Noviembre de 2010). *INIAP*. Recuperado el Septiembre de 2014, de Direccion de transferencia y tecnologia: [http://www.iniap.gob.ec/~iniapgob/sitio/images/stories/descargas/capacitaciones/linea\\_de\\_base\\_2da\\_entrega.pdf](http://www.iniap.gob.ec/~iniapgob/sitio/images/stories/descargas/capacitaciones/linea_de_base_2da_entrega.pdf)
- 54.Kaizhi, & col. (2012). Improved composting of poultry feces via supplementation with ammonia oxidizing archaea . *Bioresource Thecnology*, 70-77.
- 55.Keener, H., Marugg, C., Hansen, R., & Hoitink, H. (1993). *Optimizing the efficiency of the composting process. Science and Engineering of Composting: design, environmental, microbiological and utilization aspects*. Ohio: Renaissance Publications.
- 56.Kiely, G. (1999). *Ingeniería Ambiental: fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*. España: Mc Graw Hill.
- 57.Krogmann, U., & Korner, I. (2000). Technology and strategy of composting In: *Environmental Processes – Wastewater and Waste Treatment. Biotechnology*(11a), 127-150.
- 58.Kulcu, R., & Yaldiz, O. (2004). Determination of aeration rate and kinetics of composting some agricultural wastes. *Biores. Technol.*(93), 49-57.
- 59.Liang, O., Das, K., & McClendon, R. (2003). The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend. *Bioresource Technology*(86), 131-137.
- 60.Lin, C. (2008). A negative-pressure aeration system for composting food wastes. *Bioresour. Technol.*7651–7656(99), 7651–7656.

- 61.Lonsane, B., Guildyal, N., Budiatman, S., & Ramakrishna, S. (1985).** Engineering aspects of solid state fermentation. *Enzym. Microb. Tech.*(7), 258-265.
- 62.MacGregor, S., Miller, F., Psarianos, K., & Finstein, M. (1981).** *Composting Process Control Based on Interaction Between Microbial Heat output and Temperature*. Recuperado el 1 de Agosto de 2015
- 63.Mason, I. (2006).** Mathematical modelling of the composing process: A review. *Waste Management*(26), 3-21.
- 64.McCabe, W. L., Smith, J., & col. (2000).** *Drying of solids in Unit Operations of Chemical Engineering*. New York: McGraw Hill.
- 65.Mengchun, & col. (2010).** The effect of aeration rate on forced-aeration composting of chicken manure. *Bioresource Technology*.
- 66.Mengchun, G., Fangyuan, L., An, Y., & Bing, L. (2010).** Evaluation of stability and maturity during forced-aeration composting of chicken manure and sawdust at different C/N ratios. *Chemosphere*(78), 614-619. Obtenido de [www.elsevier.com/locate/chemosphere](http://www.elsevier.com/locate/chemosphere)
- 67.Meunchang y col, S. (2005).** co-composting of filter cake and bagasse; by-products from a sugar mill. *Biores. Technol.*(96), 437–442.
- 68.Michael, M., Gerasimos, C., Akrotos, S., Athanasia, G., Tekerlekopoulou, D., & Vayenas, V. (2011).** International Biodeterioration & Biodegradation. *ELSEVIER*, 560-564. Recuperado el Septiembre de 2014
- 69.Miller, F. C., & S. T. (1983).** *A Composting Procesing Failure: Diagnosis and Remedy*.
- 70.Miller, F., & col. (1983).** Composting based on moderately thermophilic and aerobic conditions for the production of commercial mushroom growing compost. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 278-296.
- 71.Miller, F., Harper, E., & Macauley, B. a. (1990).** Composting based on moderately thermophilic and aerobic conditions for the production of commercial mushroom growing compost. *Australian Journal of Experimental Agriculture*(30), 278-296.
- 72.MIPRO. (14 de Abril de 2011).** Ecuador: Gobierno apoya exportación de brócoli a Europa de indígenas de Chimborazo. *Diario Opinion*.

- 73. Moreno Casco, J. (2007).** *Modelización Matemática del Sistema de Compostaje*. Barcelona: Mundiprensa.
- 74. Mott, R. (2006).** *Mecanica de Fluidos*. Mexico: PEARSON Educacion.
- 75. Mudgett, R. (1986).** *Solid-state fermentations*. (A. D. Solomon., Ed.) Washington, D.C.: American Society for Microbiology.
- 76. Mudgett, R., Nash, J., & Rufner, R. (1982).** Controlled gas environments in solid substrate fermentations. *Dev. Ind. Microbiol.*(23), 397-405.
- 77. Municipio de Colta. (13 de 05 de 2014).** *Municio del Canton Colta*. Obtenido de <http://www.municipiodecolta.gob.ec/municolta/index.php/colta/2012-10-01-19-19-46>
- 78. Muñoz, M. (2008).** *Manual de Manejo de Residuos Sólidos Urbanos*. Quito, Ecuador: ASAMTECH CIA LTDA. Obtenido de <http://asamtech.com/home.php>
- 79. Nakadai, T., & Nasuno, S. (1988).** Culture conditions of *Aspergillus oryzae* for production of enzyme preparation. *J. Ferment. Tech.*(66), 525-533.
- 80. Negro, M., & Solano, P. y. (1999).** Composting of sweet sorghum vagase with other wastes. *Bioresource Technology*(67), 89-92.
- 81. Neves, D., Gomes, A., & Tharelho, L. A. (2007).** Application of a dynamic model to the simulation of the composting process. *Department of Environment and Planning, University of Aveiro*, 193.
- 82. Organization, I. S. (1992).** Engrais solides – Me'thode simple d'e'chantillonnage pour petits lots., (págs. 1-5).
- 83. Pandey, A. (2003).** Solid-state fermentation. *Biochem. Eng. J.*(13), 81-84.
- 84. Peña, E. (2002).** *Manual para la producción de abonos orgánicos en la agricultura urbana*. Costa Rica: CINA.
- 85. PNUMA. (2000).** [http://www.unep.org/yearbook/2010/PDF/UNEP\\_ES\\_2010\\_low.pdf](http://www.unep.org/yearbook/2010/PDF/UNEP_ES_2010_low.pdf)  
*Perspectivas del Medio Ambiente Mundial*. Recuperado el 10 de Enero de 2013

- 86.Pucha, P. (2007).** *Verificacion y Cuantificacion de Microorganismos involucrados en el proceso de compostaje aerotermico de residuos de produccion organica*. Riobamba: TESIS ESPOCH.
- 87.Reid, I. D. (1989).** Solid-state fermentations for biological delignification. *Enzym. Microb. Tech.*(11), 786-803.
- 88.Revilla, A. (1982).** Tecnología de la leche. San José, Costa Rica.
- 89.Richard, N. (1977).** *Compost Utilization In Horticultural Cropping Systems*.
- 90.Richard, T., Hamelers, H., & Veeken, A. (2002).** Moisture relationships in composting processes. *Compost Science and Utilization*(10), 286-302.
- 91.Sánchez, M. (1999).** Relationships between water-soluble carbohydrate and phenol fractions and the humification indices of organic wastes during composting. *Biores. Technol.*(70), 193-201.
- 92.Sato, K., Nagatani, M., & Sato, S. (1982).** A method of supplying moisture to the medium in a solid-state culture with forced aeration. *J. Ferment. Tech.*(60), 667-673.
- 93.Saucedo-Castaneda, & col. (1990).** Heat transfer simulation in solid substrate fermentation. *Biotechnol BioEng*, 802-808.
- 94.Secretaria del Ambiente. (2012).** *MINISTERIO DEL AMBIENTE*. Recuperado el 12 de Enero de 2015, de <http://www.ambiente.gob.ec/>
- 95.Silman, R. (1980).** Enzyme formation during solid-substrate fermentation in rotating vessels. *Biotechnol. Bioeng.* (22), 411-420.
- 96.SINAGAP. (2013).** *Boletin Situacional Sistema de Informacion Nacional de Agricultura Ganaderia Acuacultura y Pesca*. Obtenido de SINAGAP: <http://sinagap.agricultura.gob.ec/phocadownloadpap/BoletinesCultivos/Brocoli.pdf>
- 97.SINAGAP. (Octubre de 2014).** *MAGAP*. Obtenido de <http://sinagap.agricultura.gob.ec/phocadownloadpap/BoletinesZonales/2014/mayoristaZona1/MY-Z3-OCTUBRE-14.pdf>
- 98.Sironi, S., & Capelli, L. (2007).** Continuous monitoring of odours from a composting plant using electronic noses. *Waste Management*, 389-397.

- 99. Smith-Corripio. (1991).** *Control Automático de Procesos*. Limusa.
- 100. Soumaré, M., Demeyer, A., & Tack, F. (1981).** Chemical characteristics of Malian and Belgian solid waste composts. *Bioresour. Technol.*(81), 97-101.
- 101. Stentiford, E. (1996).** Composting control: principles and practice. (M. De Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes, & T. Papi, Edits.) *The science of composting*, 49.
- 102. Stentiford, E. (1996.).** Composting control: principles and practice. In: de Bertoldi, M. En M. de Bertoldi, *The Science of Composting. Part I.* (págs. 49-59). Blakie Academic and Professional,.
- 103. Strom, P. (1985).** Effects of temperature on bacterial species diversity in thermophilic solid-waste composting. *Appl. Environ. Microbiol.* (50), 889-905.
- 104. Sundberg, C., Smars, S., & Jönsson, H. (2004).** Low pH as an inhibiting factor in the transition from mesophilic to thermophilic phase in composting. *Bioresource Technologies*(95), 145–150.
- 105. Sztern, D., & Pravia, M. (1999).** Manual Para la Elaboración de Compost Bases Conceptuales y Procedimientos. Recuperado el 20 de Diciembre de 2014, de <http://www.ops.org.uy/pdf/compost.pdf>
- 106. Tchobanoglous, G., & Kreith, F. (1993).** *Handbook of solid waste management* (2 ed.). McGraw Hill. Recuperado el Noviembre de 2014
- 107. Thompson, J. (1984).** Experiences at Static Pile Composting Operations Technology Transfer. *U.S. EPA, Municipal Environ. Res.*
- 108. Tiquia, S., & Tam, N. (1998).** Elimination of phytotoxicity during co-composting of spent pig-manure sawdust litter and pig sludge. *Bioresour. Technol.*(65), 43-49.
- 109. Tiquia, S., Tam, N., & Hodgkiss, I. (1996).** Microbial activities during composting of spent pig-manure sawdust litter at different moisture contents. *Bioresour. Technol.*(55), 201-206.
- 110. Trevelyan, W. (1974).** The enrichment of cassava by moist-solids fermentation. *Trop. Sci.*(16), 179-194.
- 111. UNICAN. (2012).** *Universidad de Cantabria*. Obtenido de <http://ocw.unican.es/enseanzas-tecnicas/mecanica-de-fluidos-y-maquinas-hidraulicas/materiales/T06.pdf>

112. **US Composting Council. (1994).** Guide to compost.
113. **Vilarino, F., & Taibo, A. (19 de Diciembre de 2009).** *Etapas del proceso de compostaje*. Recuperado el 24 de Enero de 2015, de <http://proyectogestionresiduos.wordpress.com/2009/12/05/etapas-del-proceso-compostaje>
114. **Vuorinen, A., & Saharinen, M. (1997).** Evolution of microbiological and chemical parameters during manure and straw co-composting in a drum composting system. *Agric. Ecosyst. Environ.*(66), 19-29.
115. **Weppen, P. (2001).** Process calorimetry on composting of municipal organic wastes. *Biomass & Bioenergy*(21), 289-299.
116. **Wong, J., & Li, S. (1995).** Coal fly ash as a composting material for sewage sludge: effects on microbial activities. *Environ. Technol.*(16), 527–537.
117. **Wong, J., Mak, K., Chan, N., Lam, A., & Fang, M. (2001).** Co-composting of soybean residues and leaves in Hong Kong. *Bioresour. Technol.*(76), 99-106.
118. **Wood, B. (1977).** Oriental food uses of *Aspergillus*. In Genetics and physiology of *Aspergillus*. *Academic Press. London.*, 481-489.
119. **Zewczyk, K. (1993).** The influence of heat and mass transfer on solid state fermentation. *Acta Biochim Pol*, 90-92.
120. **Zhang, Y., & He, Y. (2006).** Co-composting solid swine manure with pine sawdust as organic substrate. *Bioresour. Technol.* (97), 2024-2031.
121. **Zucconi, F., & Bertoldi, M. (1987).** Compost specifications for the production and characterization of compost from municipal solid waste. Compost: production, quality and use. *Elsevier Applied Science Publishers*.
122. **Zucconi, F., Pera, A., Forte, M., & de Bertoldi, M. (1981).** Evaluating toxicity of immature compost. *Biocycle*(22), 54-57.

## ANEXOS

### ANEXO A

#### TULSMA LIBRO VI ANEXO VI TABLA 2

##### NORMAS GENERALES PARA EL TRATAMIENTO DE DESECHOS SÓLIDOS NO PELIGROSOS

Las presentes disposiciones se refieren a procesos convencionales a los que deben someterse los desechos sólidos, cuando a consideración de las Municipalidades o de las entidades pertinentes así se considere necesario.

**4.9.1** Los desechos sólidos cuando luego del análisis de factibilidad técnica, económica y ambiental no puedan ser reciclados o reutilizados, deberán ser tratados por el generador de los desechos, con la finalidad de mejorar sus condiciones para su disposición final o eliminación, por ello los fines del tratamiento son:

- a) Reducción del volumen.
- b) Reducción del peso.
- c) Homogeneización de componentes.
- d) Reducción del tamaño.
- e) Uniformización del tamaño.

**4.9.2** El funcionamiento de las plantas de tratamiento de desechos sólidos deberá contar con la autorización de funcionamiento expedida por la Entidad Ambiental de Control.

**4.9.3** Todo proyecto de construcción, ampliación o modificación de plantas de tratamiento de desechos sólidos deberá tener la aprobación de la Entidad Ambiental de Control.

**4.9.4** En el funcionamiento de los incineradores de desechos sólidos, deberá darse cumplimiento a las disposiciones contempladas en la presente Norma para la Prevención y Control de la contaminación del aire.

**4.9.5** Para detalles específicos relacionados con el sistema de tratamiento de desechos sólidos, se deberán utilizar las Normas de Diseño para la Elaboración de Proyectos de Sistemas de Aseo Urbano que elaborará el Ministerio del Ambiente.

En el apartado 4.13 establece normas generales para la recuperación de desechos sólidos no peligrosos.

Normas generales para la recuperación de desechos sólidos no peligrosos

El reúso y reciclaje de desechos sólidos tiene dos propósitos fundamentales:

- a) Recuperación de valores económicos y energéticos que hayan sido utilizados en el proceso primario de elaboración de productos.
- b) Reducción de la cantidad de desechos sólidos producidos, para su disposición final sanitaria.

De igual manera, establece límites máximos permisibles de contaminantes básicos a monitorear en el punto de control.

## NIVELES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES BÁSICOS

Sustancia química	Límite máximo permitido (mg/l)
Arsénico	0.05
Bario	1.0
Benceno	0.005
Cadmio	0.01
Cloruro de vinilo	0.002
Cromo hexavalente	0.05
2,4 diclorofenil ácido acético	0.1
1,4 Diclorobenceno	0.075
1,2 Dicloroetano	0.005
1,1 Dicloroetileno	0.007
Endrin	0.0002
Fluoruros	4.0
Lindano	0.004
Mercurio	0.002
Metoxicloro	0.1
Nitratos	10.0
Plata	0.05
Plomo	0.05
Selenio	0.01
Tetracloruro de carbono	0.005
Toxafeno	0.005
1,1,1 Triclorometano	0.2
Tricloroetileno	0.005
2,4,5 Triclorofenil ácido acético	0.01

### ANEXO B

#### NORMA EUROPEAN COMMISSION

Establece normas que proporcionan un alto nivel de protección del medio ambiente, para:

Proteger el suelo y asegurar que el uso de los residuos biológicos tratados y no tratados se promuevan en beneficio de la agricultura y generen una mejora ecológica.

- Asegurar que los derechos humanos, así como la salud animal y vegetal no se vean afectada por el uso de tratados o residuos biológicos sin tratar.

- Garantizar el funcionamiento del mercado interior y evitar obstáculos al comercio y distorsiones y restricción de la competencia dentro de la Comunidad.

En este documento se establece las directrices europeas para que los residuos biológicos y compost sean considerados estabilizados, de esta forma el contenido en materia orgánica no debe exceder el 30%. La siguiente tabla presenta los valores límites establecidos para los metales pesados según las diferentes clases de compost y residuo biológico estabilizados, en base al ANEXO III del documento.



**Calidad ambiental para las clases compost y los residuos orgánicos estabilizados**

Parámetro	Compost/digestado(*)		Residuo Biológico Estabilizado (*)
	Clase 1	Clase 2	
Cd (mg/Kg dm)	0.7	1.5	5
Cr (mg/Kg dm)	100	150	600
Cu (mg/Kg dm)	100	150	600
Hg ((mg/Kg dm)	0.5	1	5
Ni (mg/Kg dm)	50	75	150
Pb (mg/Kg dm)	100	150	500
Zn (mg/Kg dm)	200	400	1500
PCBs (mg/Kg dm)(**)	-	-	0.4
PAHS (mg/Kg dm) (**)	-	-	3
Impurezas >2mm	<0.5 %	<0.5%	<3%
Grava y piedras > 5mm	<5%	<5%	-

(\*): Normalizado para el contenido de materia orgánica de 30%;

(\*\*): Los valores umbral para los contaminantes orgánicos que se encuentran en coherencia con la Directiva sobre lodos de depuradora.

## **ANEXO C**

### **NORMA EPA 2001**

La Agencia de Protección Ambiental EPA, en la Sección 450 (d) de la Ley de Agua Limpia (CWA) dirigida por la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (EPA) publicó en el año 2001, una normativa que contiene las directrices para la utilización o eliminación de lodos de depuradoras. Esta sección también prevé efectos adversos de los contaminantes tóxicos en los lodos de las aguas residuales que se utilizan. La EPA publicó un reglamento final del Código de Regulaciones Federales (CFR), que indica en el apartado 503, sección 405 (d), los requerimientos de uso de lodos de aguas residuales o de prácticas de eliminación, así como la aplicación de lodos de depuradora a la tierra, la colocación de los lodos de depuradora en un vertedero de superficie, la colocación de los lodos de depuradora en un vertedero municipal de residuos sólidos y el vertido de los lodos de depuradora de aguas residuales en un incinerador, el contenido máximo aceptable de metales pesados que deben tener tales residuos para su aplicación en el suelo (Tabla 4). En este documento también se establece el límite establecido de materia orgánica entre 50-60% para considerarse un residuo orgánico estabilizado antes de ser aplicado directamente en el suelo, de forma que no altere sus equilibrios biológicos generando contaminación.

Límites de contaminantes químicos en biosólidos para su aplicación al suelo (EPA, 2001)

	Concentración límite (mg/kg)	Carga acumulada de contaminante (kg/ha)	Concentración del contaminante (mg/kg)	Carga anual (kg/ha/periodo 365 días)
As	75	41	41	2.0
Cd	85	39	39	1.9
Cr	3000	3000	1200	150
Cu	4300	1500	1500	75
Pb	840	300	300	15
Hg	57	17	17	0.85
Mo	75	N/A	N/A	N/A
Ni	420	420	420	21
Se	100	100	36	5.0
Zn	7500	2800	2800	140

## ANEXO D

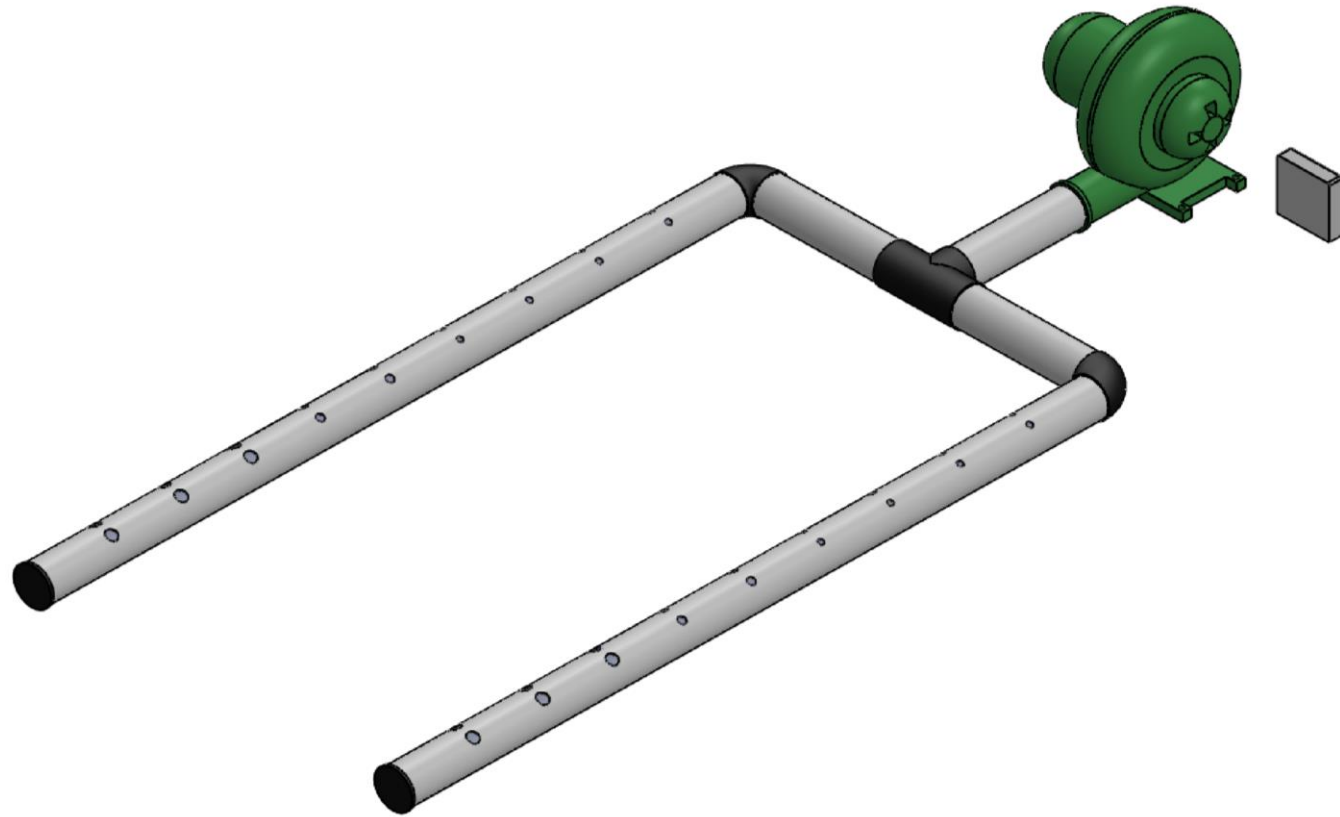
Tabla de propiedades del aire a 1 atm de presión

Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Densidad $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico $c_p$ $\text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	Viscosidad dinámica $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl Pr
-150	2.866	983	0.01171	$4.158 \times 10^{-6}$	$8.636 \times 10^{-6}$	$3.013 \times 10^{-6}$	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	$8.036 \times 10^{-6}$	$1.189 \times 10^{-5}$	$5.837 \times 10^{-6}$	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	$1.252 \times 10^{-5}$	$1.474 \times 10^{-5}$	$9.319 \times 10^{-6}$	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	$1.356 \times 10^{-5}$	$1.527 \times 10^{-5}$	$1.008 \times 10^{-5}$	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	$1.465 \times 10^{-5}$	$1.579 \times 10^{-5}$	$1.087 \times 10^{-5}$	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	$1.578 \times 10^{-5}$	$1.630 \times 10^{-5}$	$1.169 \times 10^{-5}$	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	$1.696 \times 10^{-5}$	$1.680 \times 10^{-5}$	$1.252 \times 10^{-5}$	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	$1.818 \times 10^{-5}$	$1.729 \times 10^{-5}$	$1.338 \times 10^{-5}$	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	$1.880 \times 10^{-5}$	$1.754 \times 10^{-5}$	$1.382 \times 10^{-5}$	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	$1.944 \times 10^{-5}$	$1.778 \times 10^{-5}$	$1.426 \times 10^{-5}$	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	$2.009 \times 10^{-5}$	$1.802 \times 10^{-5}$	$1.470 \times 10^{-5}$	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	$2.074 \times 10^{-5}$	$1.825 \times 10^{-5}$	$1.516 \times 10^{-5}$	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	$2.141 \times 10^{-5}$	$1.849 \times 10^{-5}$	$1.562 \times 10^{-5}$	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	$2.208 \times 10^{-5}$	$1.872 \times 10^{-5}$	$1.608 \times 10^{-5}$	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	$2.277 \times 10^{-5}$	$1.895 \times 10^{-5}$	$1.655 \times 10^{-5}$	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	$2.346 \times 10^{-5}$	$1.918 \times 10^{-5}$	$1.702 \times 10^{-5}$	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	$2.416 \times 10^{-5}$	$1.941 \times 10^{-5}$	$1.750 \times 10^{-5}$	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	$2.487 \times 10^{-5}$	$1.963 \times 10^{-5}$	$1.798 \times 10^{-5}$	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	$2.632 \times 10^{-5}$	$2.008 \times 10^{-5}$	$1.896 \times 10^{-5}$	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	$2.780 \times 10^{-5}$	$2.052 \times 10^{-5}$	$1.995 \times 10^{-5}$	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	$2.931 \times 10^{-5}$	$2.096 \times 10^{-5}$	$2.097 \times 10^{-5}$	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	$3.086 \times 10^{-5}$	$2.139 \times 10^{-5}$	$2.201 \times 10^{-5}$	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	$3.243 \times 10^{-5}$	$2.181 \times 10^{-5}$	$2.306 \times 10^{-5}$	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	$3.565 \times 10^{-5}$	$2.264 \times 10^{-5}$	$2.522 \times 10^{-5}$	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	$3.898 \times 10^{-5}$	$2.345 \times 10^{-5}$	$2.745 \times 10^{-5}$	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	$4.241 \times 10^{-5}$	$2.420 \times 10^{-5}$	$2.975 \times 10^{-5}$	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	$4.593 \times 10^{-5}$	$2.504 \times 10^{-5}$	$3.212 \times 10^{-5}$	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	$4.954 \times 10^{-5}$	$2.577 \times 10^{-5}$	$3.455 \times 10^{-5}$	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	$5.890 \times 10^{-5}$	$2.760 \times 10^{-5}$	$4.091 \times 10^{-5}$	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	$6.871 \times 10^{-5}$	$2.934 \times 10^{-5}$	$4.765 \times 10^{-5}$	0.6935
350	0.5664	1056	0.04721	$7.892 \times 10^{-5}$	$3.101 \times 10^{-5}$	$5.475 \times 10^{-5}$	0.6937
400	0.5243	1069	0.05015	$8.951 \times 10^{-5}$	$3.261 \times 10^{-5}$	$6.219 \times 10^{-5}$	0.6948
450	0.4880	1081	0.05298	$1.004 \times 10^{-4}$	$3.415 \times 10^{-5}$	$6.997 \times 10^{-5}$	0.6965
500	0.4565	1093	0.05572	$1.117 \times 10^{-4}$	$3.563 \times 10^{-5}$	$7.806 \times 10^{-5}$	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	$1.352 \times 10^{-4}$	$3.846 \times 10^{-5}$	$9.515 \times 10^{-5}$	0.7037
700	0.3627	1135	0.06581	$1.598 \times 10^{-4}$	$4.111 \times 10^{-5}$	$1.133 \times 10^{-4}$	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	$1.855 \times 10^{-4}$	$4.362 \times 10^{-5}$	$1.326 \times 10^{-4}$	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	$2.122 \times 10^{-4}$	$4.600 \times 10^{-5}$	$1.529 \times 10^{-4}$	0.7206
1000	0.2772	1184	0.07868	$2.398 \times 10^{-4}$	$4.826 \times 10^{-5}$	$1.741 \times 10^{-4}$	0.7260
1500	0.1990	1234	0.09599	$3.908 \times 10^{-4}$	$5.817 \times 10^{-5}$	$2.922 \times 10^{-4}$	0.7478
2000	0.1553	1264	0.11113	$5.664 \times 10^{-4}$	$6.630 \times 10^{-5}$	$4.270 \times 10^{-4}$	0.7539

*Nota:* Para gases ideales,  $c_p$ ,  $k$ ,  $\mu$  y Pr son independientes de la presión. Las propiedades  $\rho$ ,  $\nu$  y  $\alpha$  a una presión  $P$  distinta a 1 atm se determinan cuando se multiplican los valores de  $\rho$  a la temperatura dada por  $P$  (en atm) y cuando se dividen  $\nu$  y  $\alpha$  entre  $P$  (en atm).

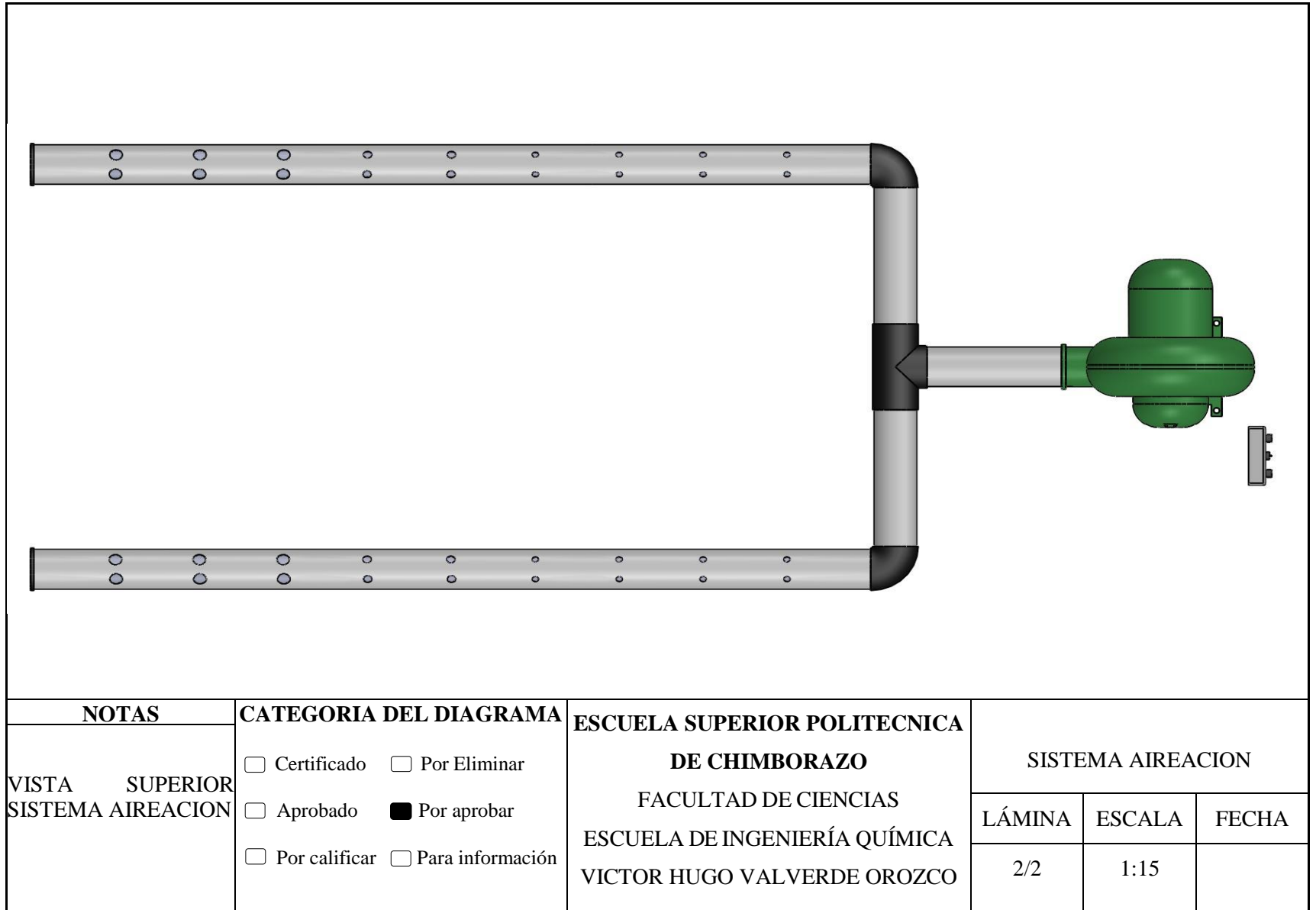
*Fuente:* Datos generados a partir del Software EES desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. Fuentes originales: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 198; and Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3; Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11; Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena, y P. Hestermans, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0-306067020-8.

## ANEXO E DIAGRAMA VISTA ISOMETRICA DEL SISTEMA DE AIREACION

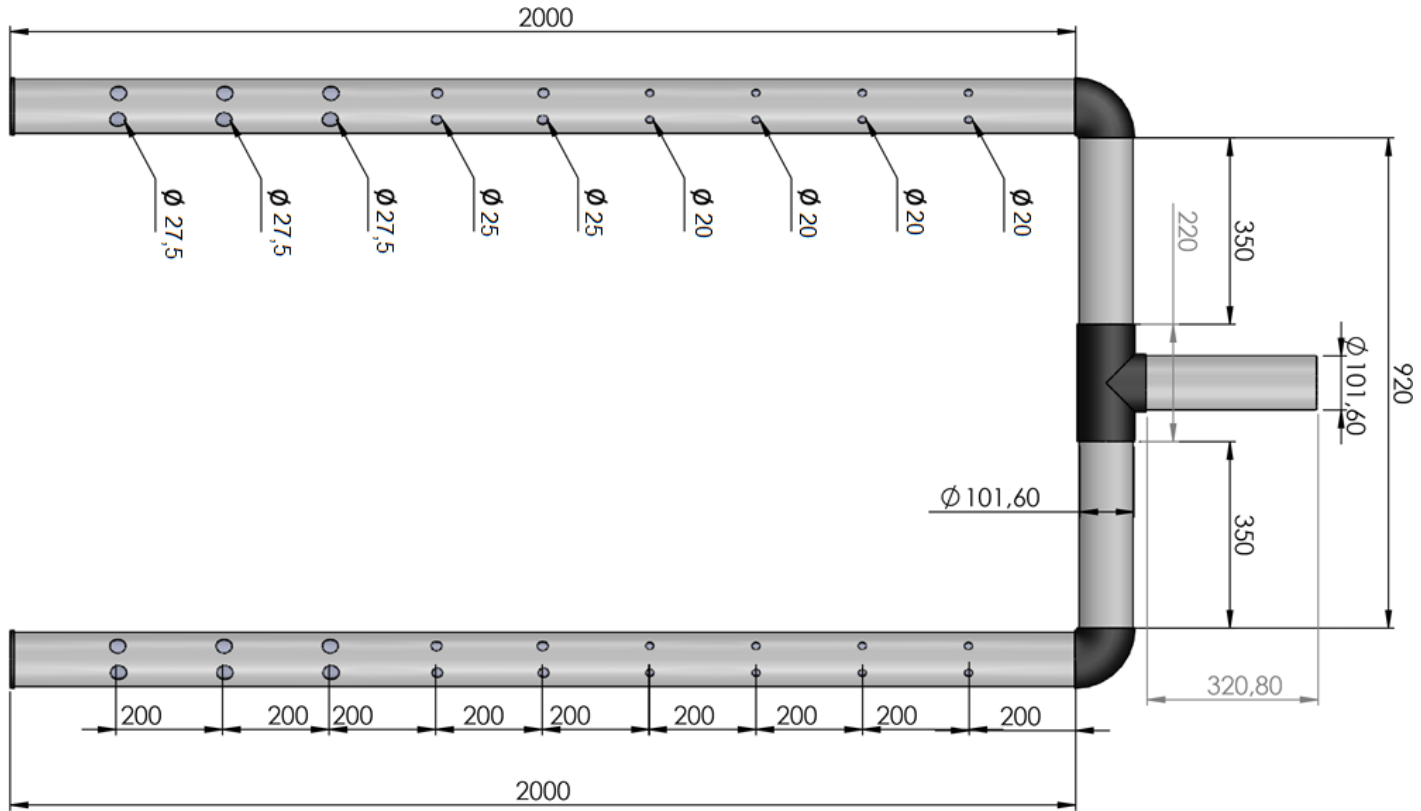


NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA	ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO	SISTEMA AIREACION		
VISTA ISOMETRICA ESQUEMA TRIDIMENSIONAL	<input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/> Por Eliminar	FACULTAD DE CIENCIAS	LÁMINA	ESCALA	FECHA
	<input type="checkbox"/> Aprobado <input checked="" type="checkbox"/> Por aprobar	ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA	1/2	1:15	
	<input type="checkbox"/> Por calificar <input type="checkbox"/> Para información	VICTOR HUGO VALVERDE OROZCO			

## ANEXO F DIAGRAMA VISTA SUPERIOR DEL SISTEMA DE AIREACION

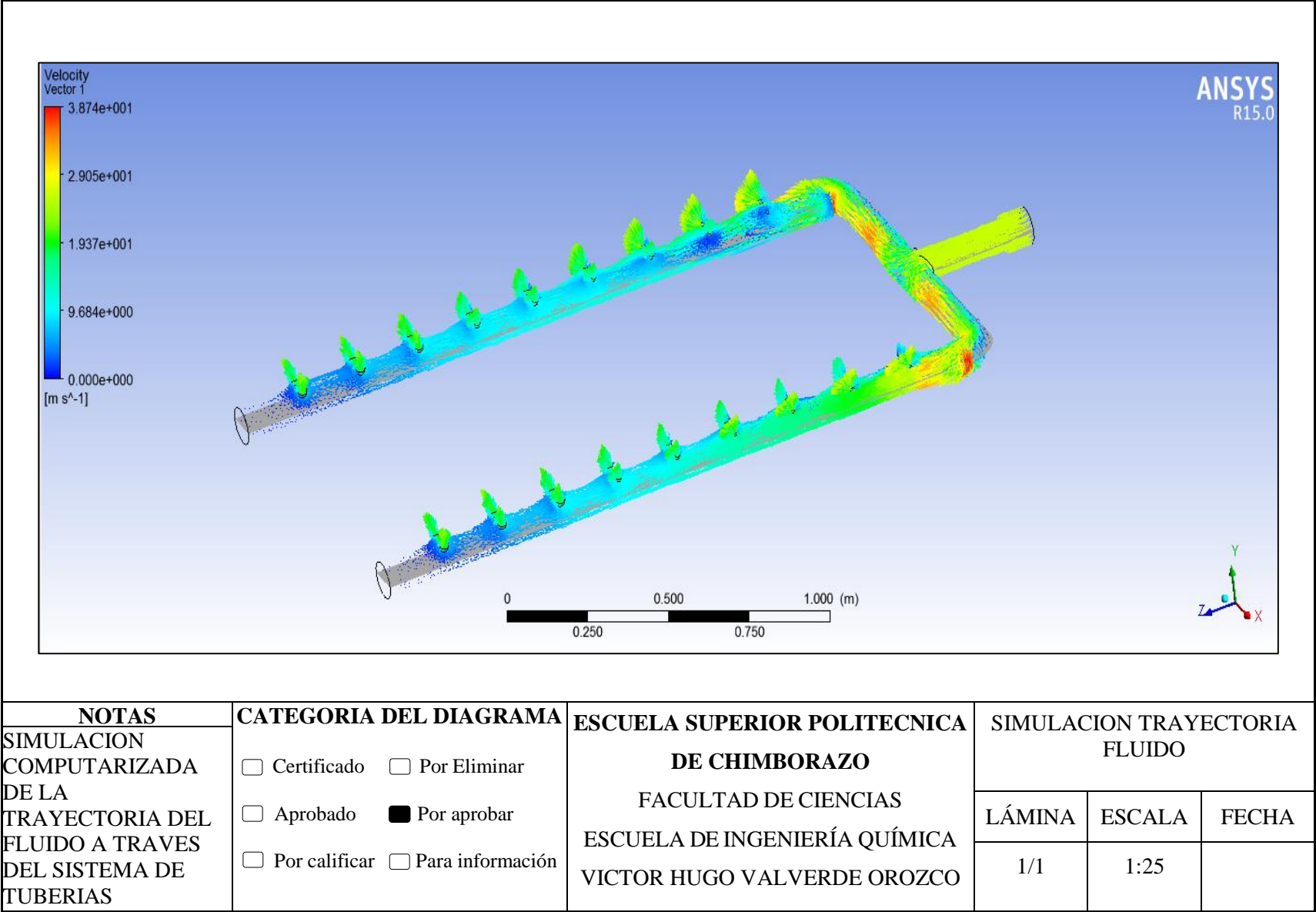


ANEXO G DIAGRAMA DIMENSIONES DEL SISTEMA DE TUBERIAS



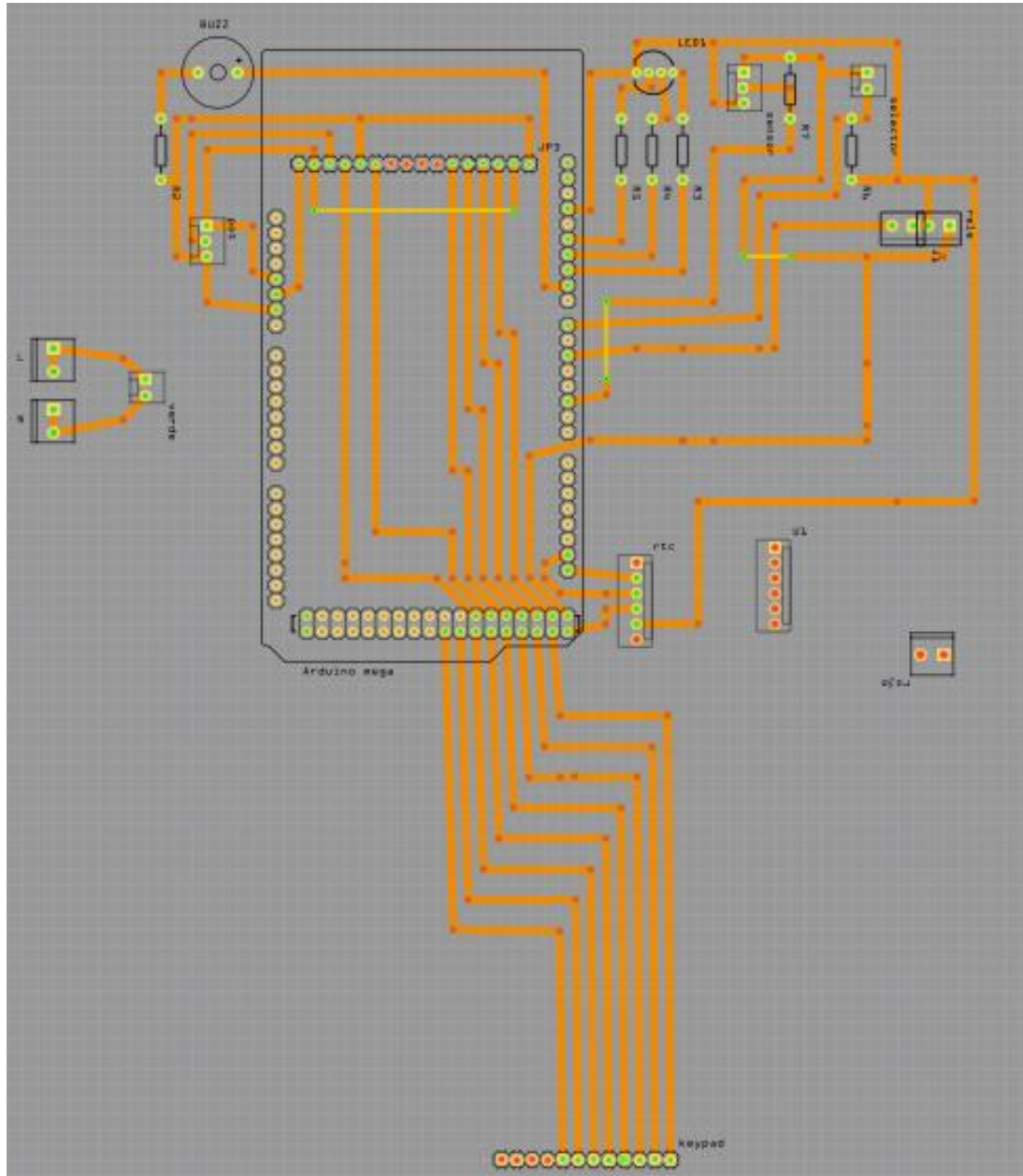
NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA	ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA VICTOR HUGO VALVERDE OROZCO	SISTEMA DE TUBERIAS		
DIMENSIONES SISTEMA TUBERIAS	<input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/> Por Eliminar		LÁMINA	ESCALA	FECHA
	<input type="checkbox"/> Aprobado <input checked="" type="checkbox"/> Por aprobar		1/1	1:15	
	<input type="checkbox"/> Por calificar <input type="checkbox"/> Para información				

ANEXO H SIMULACION DE LA TRAYECTORIA DEL FLUIDO EN EL SISTEMA DE TUBERIAS



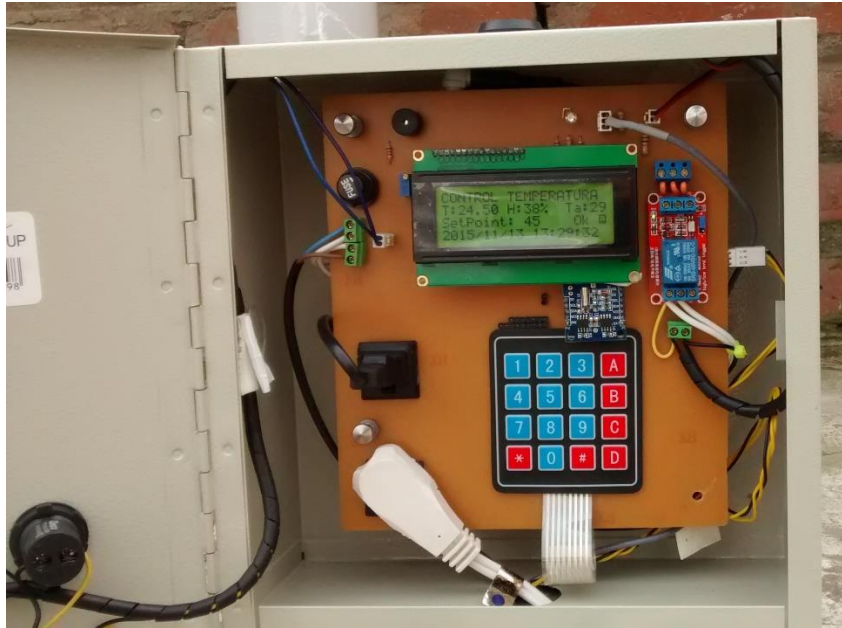


## ANEXO I DIAGRAMA DEL CIRCUITO ELECTRICO DEL SISTEMA DE CONTROL





## ANEXO J VISTA FRONTAL DEL SISTEMA DE CONTROL AUTOMATICO



## ANEXO K SISTEMA DE AIREACIÓN



## **ANEXO L MANUAL DE OPERACIÓN DEL EQUIPO**

### **MANUAL DE OPERACIÓN**



### **SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA PROCESO DE COMPOSTAJE**

Las funciones del equipo son las siguientes:

El equipo presenta dos modos de operación del sistema de aireación:

- a. Operación temporizada. Encendido programable del ventilador por tiempos definidos por el operador.
- b. Operación automática del sistema de aireación bajo demanda basada en el monitoreo de temperatura interna de la pila, previa programación de una temperatura máxima o Setpoint.

Ambos modos dependen de la etapa de desarrollo y características del proceso, para cumplir con el suministro de aire necesario, para oxigenar la materia con el objetivo de que la descomposición aerobia de los residuos se realice de manera adecuada, y para extraer el exceso de humedad.

- 1- El equipo mantiene la temperatura del material compostado por debajo de un valor pre-programado X °C, controlando la misma mediante un sistema de control retroalimentado.
- 2- Para que el usuario pueda verificar que el proceso de compostaje se efectúa adecuadamente, muestra las variables de proceso tales como temperatura interna de la mezcla de materiales, humedad y temperatura ambiente a través de todas las etapas del proceso en una pantalla de cristal líquido (LCD).
- 3- Despliega la temperatura de operación máxima en pantalla (en el modo automático), y permite su ajuste.
- 4- Muestra el intervalo de aireación en pantalla (en el modo temporizado), y permite su ajuste.

También se ofrece la posibilidad de conectar el sistema de control a una computadora, para almacenar datos en tiempo real del proceso, o modificar la estructura de control del micro controlador

## **1. Introducción**

En este documento se describe todos los procedimientos que hay que seguir para operar el equipo de control de temperatura de manera correcta y segura, por tal razón una copia de este documento debe permanecer junto al equipo, ya que además contiene las especificaciones técnicas de cada dispositivo eléctrico y electrónico instalado en la tarjeta de control.

## **2. Normas de seguridad**

El personal que vaya a trabajar con este equipo debe tener conocimientos técnicos y tal sea el caso que no los tenga debe recibir una capacitación previa, ya que de esto depende el correcto funcionamiento y la vida útil del mismo.

El equipo debe ser utilizado exclusivamente para el control de temperatura y en condiciones absolutamente seguras.

Se deben observar y seguir siempre las recomendaciones y normas de seguridad. Cualquier operador que trabaje con este equipo debe:

- Observar con especial atención las recomendaciones de seguridad.

- Deben respetarse las normas y regulaciones sobre prevención de accidentes.

La persona responsable del funcionamiento del proceso debe comprometerse en asegurar que el personal a utilizar debe:

- Estar familiarizado y habituados a trabajar con las normas básicas relacionadas con la seguridad operativa y prevención de accidentes.
- Haber recibido instrucción y capacitación suficiente en el manejo del equipo.

El no cumplimiento de la instrucción de operación, transporte, almacenamiento, montaje, puesta a punto, funcionamiento, mantenimiento y preparación del equipo, puede crear situaciones riesgosas, mismas que pueden ocasionar daños físicos o lesiones al personal o a terceras partes, así como la integridad del equipo.

### **3. Recomendaciones a tener en cuenta antes de iniciar el control de temperatura**

El documento de la Tesis, es un Manual con toda la información técnica necesaria, por lo que es parte esencial de éste sistema de control de temperatura, por tal razón debe conservarse y permanecer en un lugar seguro, accesible para el operador.

Observar los datos de las fichas técnicas de los componentes eléctricos y electrónicos del equipo de control de temperatura.

Verificar el estado físico de la tarjeta electrónica, de presentarse anomalías avisar al personal encargado de la instalación del equipo.

- Las diferentes conexiones eléctricas entre los diferentes dispositivos del equipo de control de temperatura, deben conectarse y desconectarse sólo cuando la tensión principal esté desactivada.
- No excederse en la tensión requerida para el funcionamiento de los diferentes elementos electrónicos.
- No sobrepasar la presión máxima de operación de los elementos eléctricos del equipo controlador de temperatura.
- No desconectar la alimentación eléctrica de los equipos que estén en funcionamiento.
- No operar manualmente a no ser que el equipo se halle fuera de funcionamiento.
- Evitar la manipulación excesiva del cableado de los diferentes sensores para evitar averías en su funcionamiento.

- La sustitución de partes, elementos y componentes del equipo debe hacerse en correspondencia con los originales.
- Para la realización de trabajos de mantenimiento del equipo, se deberá desconectar la alimentación eléctrica principal con el fin de evitar accidentes personales y daños al equipo.
- Es importante observar que estén bien sujetos los sensores, actuadores, display y demás componentes para evitar futuros errores en el funcionamiento de los mismos.

#### **4. Suministro de energía eléctrica**

Para el suministro de energía eléctrica se conecta directamente a la línea de 110V AC, gracias a una fuente reguladora de voltaje se convierte en voltaje DC, que sirve para alimentación de los circuitos electrónicos, sensores, teclado, relé, selector e indicadores.

Conexiones del micro controlador

Para verificar las conexiones del micro controlador se debe basar en siguiente asignación de entradas y salidas.

<b>ASIGNACIÓN DE DIRECCIONES</b>			
<b>E/S</b>	<b>Pin</b>	<b>Nombre</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
Entrada	2	Pin	Sensor de temperatura
Entrada	3	Dhtpin	Sensor de humedad
Entrada	7	Pinboton	Selector automático/temporizado
Entrada	52	Rtc 1	Pin de comunicación reloj de tiempo real
Entrada	54	Rtc 2	Pin de comunicación reloj de tiempo real
Entrada	37	Fila 1	Pin de entrada fila 1 keypad
Entrada	35	Fila 2	Pin de entrada fila 2 keypad
Entrada	33	Fila 3	Pin de entrada fila 3 keypad
Entrada	31	Fila 4	Pin de entrada fila 4 keypad
Entrada	29	Columna 1	Pin de entrada columna 1 keypad
Entrada	27	Columna 2	Pin de entrada columna 2 keypad
Entrada	25	Columna 3	Pin de entrada columna 3 keypad
Entrada	23	Columna 4	Pin de entrada columna 4 keypad
Salida	32	Rs	Pin rs del lcd 20x4
Salida	30	Enable	Pin enable del lcd 20x4
Salida	28	D4	Pin d4 del lcd 20x4
Salida	26	D5	Pin d5 del lcd 20x4
Salida	24	D6	Pin d6 del lcd 20x4
Salida	22	D7	Pin d7 del lcd 20x4
Salida	5	Salida relé	Salida de activación del relé para el ventilador
Salida	12	Led rojo	Led indicador rojo
Salida	11	Led verde	Led indicador verde
Salida	9	Buzz	Alarma sonora

### **5. Puesta a punto del equipo.**

La puesta a punto se limita inicialmente a una verificación visual para asegurar que los cables, sensores y cables de alimentación de energía eléctrica sean los correctos, y que todos los componentes del equipo funcionen adecuadamente. Todos los componentes, sensores, actuadores, relé y cables están claramente marcados de forma que puedan establecerse fácilmente todas las conexiones.

Las instrucciones para la puesta a punto del sistema se muestran a continuación.

- Asegurarse que la alimentación de voltaje hacia el sistema se encuentren apagados.
- Revisar y realizar los ajustes necesarios en la estructura metálica y demás componentes del equipo de ser necesario.
- Pasar los actuadores a la posición de inicio de acuerdo a las necesidades de funcionamiento.
- Ubicar manualmente la posición de los sensores en los lugares requeridos.
- Observar que el micro controlador se encuentre con sus debidas conexiones para su correcto funcionamiento.
- Reconocer y solucionar posibles fugas de aire del sistema de tuberías.
- Conectar y verificar que el suministro de voltaje para cada uno de los elementos sea el adecuado.
- Verificar que funcionen las entradas y salidas del micro controlador mediante la observación de los leds indicadores ubicados en la tarjeta electrónica.
- Observar el funcionamiento del circuito y relé mediante la observación de los leds indicadores en cada uno de los circuitos.
- Verificar que el sensor de temperatura se encuentren en funcionamiento, observando el lcd, mismo que nos indicara la temperatura en grados centígrados.
- Correr el programa y comprobar que los tiempos de operación sean los correctos.
- Comprobar que todas las funciones del panel de control tales como inicio, paro y selector de modo de operación se encuentren operando correctamente, para que no exista errores que puedan causar daños al personal y al equipo controlador de temperatura.

## 6. Puesta en marcha del sistema de control de temperatura



En la puesta en marcha se pone en funcionamiento el equipo con todos sus componentes electrónicos para poder controlar la temperatura en el sistema.

Las instrucciones para la puesta en marcha se muestran a continuación:

- Ubicar el sensor de temperatura, dentro de la pila de compostaje en un lugar adecuado, se recomienda ubicarlo en la parte central de la pila de compostaje, a una altura de 0.5m aproximadamente, por ser la zona en la que existe mayor acumulación de calor.
- Si se puede observar la luz indicadora de color verde quiere indicar que se puede iniciar correctamente el proceso.
- Seleccionar en el selector el modo de operación del equipo, automático o temporizado, guiándonos en el lcd que nos mostrara el modo de funcionamiento.
- Colocar el sensor de humedad ambiente en un lugar apropiado para su funcionamiento
- Establecer el valor de la temperatura a la que se desea que el sistema reaccione, con ayuda del teclado de la tarjeta electrónica. Para este proceso, se debe pulsar el botón D del teclado, para entrar en el modo de introducción de valores, seguidamente ingresamos el valor en segundos, y pulsamos el botón A para guardar el valor ingresado.
- Monitorear en el lcd la temperatura deseada y la temperatura real y verificar el funcionamiento del sistema.



- Si el valor de temperatura real es mayor para el valor deseado, se activa el relé por ende el ventilador se enciende hasta que la temperatura descienda.
- Se realiza el proceso anterior indefinidamente hasta que el operador desconecte el equipo o cambie a modo temporizado
- En el modo temporizado se debe establecer el tiempo que permanece encendido y apagado el ventilador. Para este proceso, se debe pulsar el botón D del teclado, para entrar en el modo de introducción de valores, seguidamente ingresamos el valor en segundos, y pulsamos el botón B para guardar el valor ingresado y establecerlo como el tiempo de encendido, y para establecer el tiempo que permanecerá apagado pulsaremos el botón D.

## 7. Lista de fallas, causas y soluciones

Durante la ejecución el diseño, implementación, programación y puesta a punto del equipo, se pueden producir problemas en el funcionamiento del sistema de control.

En la siguiente tabla, se detallan los diferentes tipos de fallas y sus posibles causas y soluciones.

	DESCRIPCION DEL PROBLEMA	POSIBLES CAUSAS	SOLUCION
1	No se activan los sensores	Ausencia de energía	Verificar el suministro de energía en el circuito electrónico.
		Sensores mal ubicados	Ubicar los sensores en un lugar apropiado
2	El ventilador no se acciona	Falta de alimentación AC	Revisar la alimentación AC
		Relé dañado	Chequear y corregir el problema
		Falla en la tarjeta electrónica	Verificar el funcionamiento con ayuda del lcd e indicadores
3	Tarjeta electrónica no funciona	Ausencia de energía	Verificar el suministro de energía eléctrica
		Señales de entrada y salida mal asignadas	Verificar y corregir las entradas y salidas en la programación del micro controlador
		Programación incorrecta	Observar y corregir programación del micro controlador
4	No se activa el relé	Ausencia de energía	Verificar el suministro de energía y el pin del micro controlador asignado
5	Lcd no visualiza ningún mensaje	Inexistencia de datos	Checar que los pines estén conectados de acuerdo a la programación

# MANUAL PARA LA ELABORACION DE UNA PILA DE COMPOST CON RESIDUOS HORTICOLAS MEDIANTE AIREACIÓN FORZADA



**Realizado por:** Víctor Hugo Valverde

Escuela de Ingeniería Química

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO

El presente manual forma parte del proyecto de investigación denominado DISEÑO Y AUTOMATIZACION DE UN SISTEMA DE AIREACION FORZADA PARA EL CO-COMPOSTAJE DE RESIDUOS HORTICOLAS DE LA COMUNIDAD DE GATAZO CANTON COLTA, está diseñado como una guía para compostar residuos hortícolas procedentes de la actividad agrícola de la Comunidad mediante el sistema de compostaje en pilas aireadas mediante aireación forzada.

El compost se obtiene de la fermentación aerobia de una mezcla de materiales orgánicos en condiciones determinadas de humedad, aireación, temperatura y nutrientes.

Su objetivo es descomponer la materia orgánica hasta transformarse en un producto parecido a las sustancias húmicas del suelo, libre de patógenos y compuestos tóxicos, beneficioso para el suelo y para el crecimiento vegetal. La aireación forzada favorece a la descomposición de la materia orgánica, reduciendo el tiempo de producción necesario para el compost.



#### **MATERIALES NECESARIOS:**

Residuos hortícolas y diferentes tipos de estiércoles provenientes de la zona.

Pueden sustituirse cualquiera de estos materiales por unos de similares características.

Herramientas: Palas, rastrillos, carretillas. Para pilas grandes es aconsejable usar pala del tractor, picadora, volteadora, cribadora.

Es indispensable la disposición de agua para la correcta elaboración de la pila de compost.

#### **Factores a tener en cuenta para la elaboración de las pilas de compost**

Los siguientes factores se consideran para una correcta elaboración de una pila de compost.

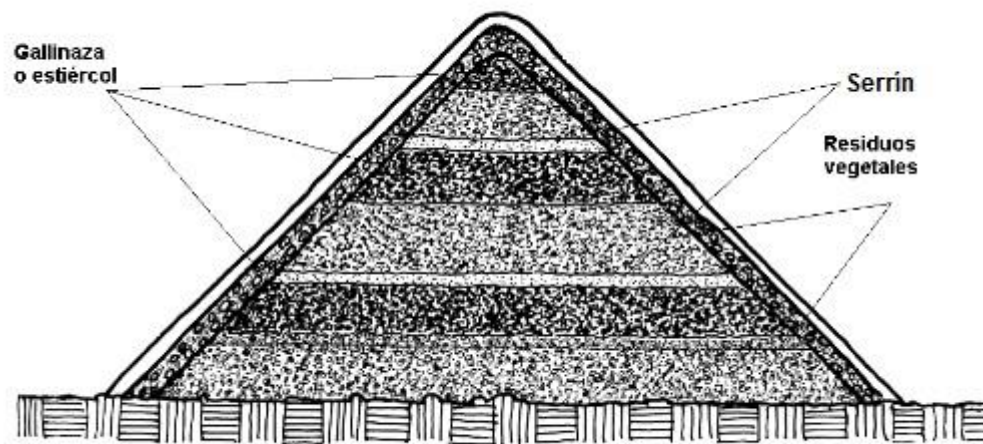
- Se debe preparar una mezcla equilibrada de los materiales a compostar para lograr una relación Carbono/Nitrógeno entre 25-35 para garantizar una descomposición adecuada de la materia.
- Se debe reducir previamente las partículas de los materiales usados hasta un tamaño adecuado (2 a 5 centímetros de diámetro) previo a su adición a la mezcla de materiales.

- Se debe realizar una corrección del pH de los materiales de partida cuando se considere necesario.
- El oxígeno es necesario e indispensable para que los microorganismos se desarrollen por tratarse de un proceso aeróbico de degradación de materia orgánica.
- La humedad se debe mantener en torno a 40-60% en la mezcla de materiales para que el proceso se desarrolle con normalidad.
- La temperatura es el parámetro que mejor indica el desarrollo del proceso. Su valor máximo no debe sobrepasar los 70°C (adecuada entre 55-65°C). Con estas temperaturas se evitan pérdidas de materia orgánica y se garantiza la destrucción de gérmenes patógenos y semillas adventicias. Para el sistema de aireación forzada, se cuenta con un equipo automatizado de aireación bajo demanda para evitar estos incrementos excesivos en la temperatura interior de la mezcla de materiales. Por lo que el control de esta variable a lo largo del proceso está garantizada.
- El tamaño adecuado de la pila para ser usada con el sistema de aireación es de metro y medio de altura con sección trapezoidal y una anchura de base de 2 metros, con un largo de 3 metros.
- Es importante contar con una estructura tipo invernadero que resguarde a la pila de las condiciones climáticas del lugar donde se instala la pila, para protegerla del sol, lluvia, viento y frío.

Si todas estas consideraciones se garantizan, al final del proceso se obtendrá un producto maduro, de olor agradable similar al olor del suelo de un bosque, de color oscuro.

### **Elaboración de la pila**

La preparación de la pila se puede realizar manualmente o de forma mecanizada. La pila se confecciona en capas o mezclando los materiales en diferentes proporciones, considerando las características del material de partida (C/N, % Humedad, entre otros). Cada una de las mezclas se las coloca en capas con un grosor de aproximadamente 1,5 cm. Esta operación se realiza hasta que la pila tenga una altitud de 2 m. Un esquema de la pila terminada se observa en la siguiente figura:



Para que se produzca la fermentación aerobia es indispensable la presencia de aire y agua. Cuando comienza la fermentación aumenta la temperatura (55 a 65°C).

En estas condiciones se asegura la eliminación de patógenos. Si se consigue una buena relación entre nitrógeno, celulosa, lignina, azúcares, humedad y aire, es tiempo de descomposición de la materia orgánica se verá reducido.

Para el uso del equipo de aireación forzada, se montarán las pilas sobre el sistema de tuberías del mismo como se ve en las siguientes figuras:





## **MANEJO DEL SISTEMA**

Una de las reglas fundamentales a tener en cuenta para un sistema como el propuesto es mantener las mismas características y materias durante la descomposición. Nunca se debe adicionar material nuevo a una pila ya conformada.

Es muy importante llevar de cada pila de Compostaje, registros de los datos más relevantes. Fecha de conformación, relación C/N de entrada, temperatura del material antes de su ingreso al sistema, temperatura ambiente y todo dato que se considere que puede ser de valor para sistematizar el proceso. El sistema automático de control que posee el equipo facilita la toma de datos de temperatura interna de las pilas, y temperatura y humedad ambiente.

Se recomienda delimitar con marcas visibles, todas las dimensiones necesarias en el área destinada para el compostaje que pueden servir como referencia para la movilización y reconfiguración de las pilas.

En la práctica, el material tenderá a explayarse, perdiendo las dimensiones iniciales. Esto es totalmente normal. Es por esta razón que al reconfigurar las pilas de compost, se debe procurar que conserve en lo posible las dimensiones de diseño originales.

### **Aireación y Homogeneización de la masa en Compostaje**

Este procedimiento tiene dos objetivos:

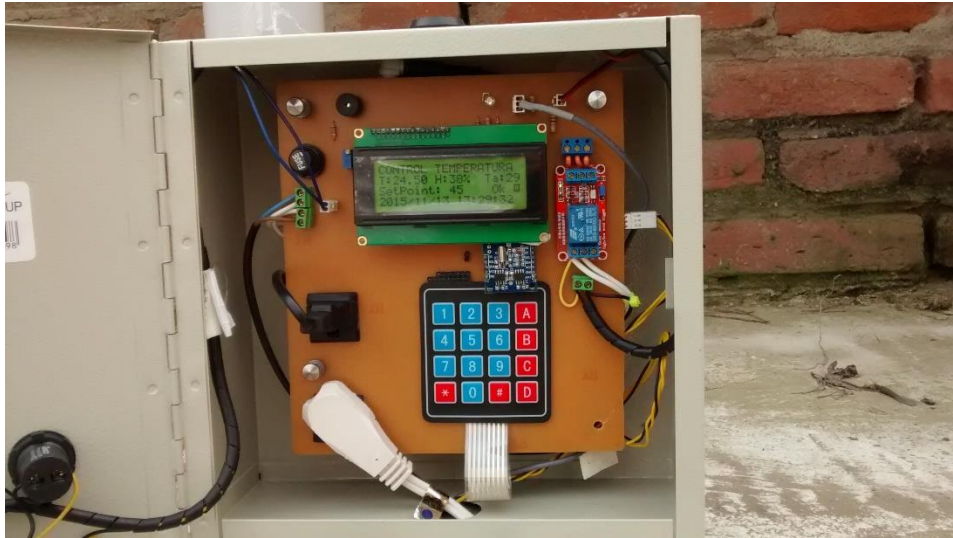
Favorecer los metabolismos aerobios y procurar que el proceso de descomposición se cumpla en toda la masa en compostaje. Esta operación se puede hacer tanto manualmente como mecánicamente. En este sistema de compostaje se usa un sistema de aireación forzada automático para airear la mezcla de materiales, evitando así el volteo manual y el consecuente tiempo y gasto económico que conlleva.

### **Cuando airear y cuando regar**

No existen frecuencias preestablecidas de aireación y riego que resulten aplicables para todos los casos posibles. Las aireaciones excesivas, son tan perjudiciales como los riegos en exceso. Uno de los parámetros, de fácil determinación que brinda el sistema de compostaje es la temperatura, y nos basaremos en ella para ejercer en gran parte un control sobre el proceso.

## Control de la Temperatura

La temperatura es registrada por el sensor del sistema de aireación en el núcleo de la pila de compost. Y se registra mediante un sensor de medición de temperatura digital.



El sistema de control automático se encarga de regular esta temperatura, solo es necesario programar la temperatura máxima en el panel de control del equipo. Las instrucciones para la programación se encuentran en el manual de operación del equipo.

## Control de Humedad

Para el control del contenido de humedad, se puede aplicar el siguiente procedimiento empírico:

1. Tomar en la mano una muestra de material.
2. Cerrar la mano y apretar fuertemente la muestra.
3. Si al realizar esta acción se verifica que sale un hilo de agua continuo del material, entonces es indicador de que el material contiene más de un 40% de humedad.
4. Si el material gotea intermitentemente, indica que su contenido en humedad es cercano al 40%.
5. Si el material no gotea y al abrir la mano conserva su forma, estimamos que la humedad se presenta entre un 20 a 30 %
6. Si abrimos el puño y el material se disgrega, se asume que el material contienen una humedad inferior al 20 %.



Se puede realizar la verificación de la humedad de la mezcla con la ayuda de un termo higrómetro, para determinar su humedad y temperatura en la marcha del proceso. Siempre se recomienda ajustar la humedad de las pilas a valores de entre 40 y 60%.

Estos procedimientos garantizarán una adecuada descomposición de la materia. Información extendida en materia de compostaje se encuentra en el documento de tesis del proyecto de investigación.